



Ricardo Alexandre Sousa Silva

Licenciado em Engenharia Física

Desenvolvimento de um manómetro de ionização de elevada estabilidade

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Física

Orientador: Prof. Orlando Teodoro

Orientador: Doutora Ana Fonseca

Júri:

Presidente: Doutora Isabel Catarino

Arguentes: Doutor Pedro Costa Pinto

Vogais: Prof. Orlando Teodoro

Doutora Ana Fonseca



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2018

Desenvolvimento de um manómetro de ionização de elevada estabilidade

Ricardo Alexandre Sousa Silva

Setembro, 2018

Desenvolvimento de um manómetro de ionização de elevada estabilidade

Copyright © Ricardo Alexandre Sousa Silva, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer, em primeiro lugar, ao Prof. Orlando Teodoro pela orientação em todas as fases da minha tese e pela transmissão de conhecimento teórico e prático, sempre com rigor científico de excelência.

À Doutora Ana Fonseca gostaria de agradecer por coorientar a minha tese e por me auxiliar nos pormenores formais da apresentação de trabalho científico.

Um especial agradecimento ao Doutor Nenad Bundaleski pela ajuda imprescindível na elaboração dos modelos físicos aplicados nas simulações e pelo conhecimento transmitido na área da física atômica e molecular.

Agradeço também ao técnico Afonso Moutinho pela colaboração essencial na montagem do controlador eletrônico e a João Faustino pela colaboração na produção do manómetro.

Devo um especial agradecimento a Ivo Figueiredo e Francisco Canhoto, não só pelos laços de amizade criados como por todo o apoio e ajuda que partilhamos no período de dissertação de mestrado assim como ao longo de toda a licenciatura e mestrado.

Agradeço aos restantes colegas de laboratório pelo espírito de camaradagem vivido em laboratório nos últimos meses, fazendo com que o trabalho desenvolvido fosse muito mais agradável e harmonioso.

Por fim, mas com a maior relevância, agradeço ao meu pai, José Amadeu Silva, que desde sempre fomentou o meu gosto pelas ciências e pelo conhecimento, e que me incutiu o sentido de responsabilidade para com os desafios que me são apresentados. Agradeço também à minha mãe, Maria Lina Silva, que sempre facilitou bastante o meu percurso e me apoiou quando mais precisava.

Resumo

Os manómetros de ionização são medidores de baixas pressões com elevada relevância para a tecnologia de alto e ultra-alto vácuo. Estes medidores possuem algumas fontes de instabilidade na medição da pressão conforme se encontra identificado na literatura. Estudos realizados através da simulação do seu funcionamento também estão documentados na literatura.

O trabalho desenvolvido está inserido no projeto europeu “*EMPIR Towards a documentary standard for an ionisation vacuum gauge – 16NRM05*” e teve por objetivo o estudo do funcionamento de manómetros de ionização existentes, tais como o Bayard-Alpert, e a simulação, produção e caracterização de um novo manómetro de elevada estabilidade que opere numa gama de pressão de 10^{-2} a 10^{-8} mbar.

Todas as simulações foram realizadas através do *software* SIMION. As simulações dos manómetros do tipo extrator e Bayard-Alpert revelaram estar em concordância com as medições experimentais da sua sensibilidade e permitiram quantificar várias contribuições para o processo de ionização.

Realizaram-se também simulações do manómetro linear, que será construído no âmbito do projeto europeu, que confirmaram a estabilidade na sensibilidade do manómetro quando este é sujeito a deformações na sua geometria.

A geometria do novo manómetro cilíndrico teve a preocupação de minimizar as fontes de instabilidade conhecidas dos vacuómetros de ionização já existentes. Após a sua simulação, a sua geometria foi otimizada e foi construído o manómetro e respetivo controlador eletrónico. Os resultados preliminares da caracterização do medidor revelaram uma sensibilidade de $4,75 \text{ mbar}^{-1}$, corroborando os valores obtidos em simulação. Futuramente deverá determinar-se a estabilidade do manómetro e o seu comportamento na medição de pressões inferiores a 10^{-8} mbar.

Palavras chave: manómetro de ionização, simulação, estabilidade, metrologia, SIMION.

Abstract

Ionisation gauges are low pressure gauges with high relevance to high-vacuum and ultra-high-vacuum production. These gauges have some sources of instability in pressure measurements whereby some are described in the literature. There are studies performed in simulation of their operation, being also documented in the literature.

The work developed is part of the European project “*EMPIR Towards a documentary standard for an ionisation vacuum gauge – 16NRM05*” and aimed to study the operation of existing ionization gauges, such as Bayard-Alpert and extractor gauge, and the simulation, production and characterization of a new high stability gauge to operate in a pressure range from 10^{-2} to 10^{-8} mbar.

All simulations were performed using SIMION software. Simulations performed on the Bayard-Alpert gauge and extractor gauge have revealed a good agreement with sensitivity experimental measurements and provided the quantification of the contributions for the ionisation process.

The simulations performed of the linear gauge that will be developed within the framework of the European project confirmed the stability in the sensitivity of the gauge when it is subject to deformations in its geometry.

The developed geometry of the cylindrical gauge was designed in order to minimize the known sources of instability of current ionisation gauges. After its simulation, its geometry was optimized, and the gauge was produced as well as an electronic controller. Preliminary tests of the gauge revealed a sensitivity of 4.75 mbar^{-1} , corroborating the results obtained in simulation. The future work relies on the total characterization of the new ionization gauge and its capability to measure pressures bellow 10^{-8} mbar.

Keywords: ionisation gauges, simulation, stability, metrology, SIMION.

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Objetivos e contexto	1
1.2	Resumo desta tese.....	1
2	A medição de alto e ultra-alto vácuo	3
2.1	Nota histórica sobre os manómetros de ionização de cátodo quente	3
2.2	Os manómetros de ionização de cátodo quente.....	4
2.2.1	Ionização de gases induzida por eletrões	4
2.2.2	Princípio de medição dos manómetros de ionização.....	5
2.2.3	Emissão secundária de eletrões induzida por iões	6
2.2.4	Dessorção induzida por eletrões	6
2.2.5	Emissão de raios X.....	7
2.3	Tipos e técnicas de medida atuais	7
2.3.1	Manómetros de ionização	7
2.3.2	Spinning rotor gauge (SRG)	10
2.3.3	Manómetros capacitivos	11
2.4	Precisão e estabilidade dos manómetros de ionização	11
3	Simulação	13
3.1	Metodologia aplicada nas várias simulações	14
3.1.1	Definição da geometria e das condições iniciais	14
3.1.2	Modelos aplicados nas simulações	14
3.2	Simulações de um manómetro “extrator” (extractor gauge)	17
3.3	Simulação de um manómetro Bayard-Alpert	23
3.4	Simulação do manómetro linear 16NRM05	29
3.5	Simulações de um novo manómetro cilíndrico	32
3.5.1	Simulação e aperfeiçoamento da ideia inicial	32
3.5.2	Simulação da estabilidade do manómetro	36

3.5.3	Simulação do conjunto de emissão.....	39
3.6	Conclusões retiradas das simulações	41
4	Projeto e montagem do manómetro cilíndrico	43
4.1	Projeto dos elétrodo.....	43
4.1.1	Montagem e ligações	43
4.1.2	Material e produção dos elétrodo	46
4.2	Controlador eletrónico	48
4.3	Produção e ensaio de cátodo.....	49
5	Resultados preliminares e conclusão.....	53
5.1	Determinação experimental da sensibilidade	53
5.2	Conclusão.....	55
6	Referências	57
	Apêndice 1 Detalhes dos modelos de simulação	59
	Anexo 1 Desenhos técnicos.....	61
	Anexo 2 Ficha técnica do módulo EMCO CA02	63
	Anexo 3 Esquema do controlador eletrónico	65

Lista de figuras

Figura 2.1: Representação esquemática de um triodo usado como manómetro de ionização.[1]	4
Figura 2.2: Sensibilidade de um manómetro de ionização em função da pressão da câmara.[1]	6
Figura 2.3: Esquematização do manómetro de Bayard-Alpert com representação das emissões internas; 1 - emissão secundária de eletrões induzida por iões; 2 – dessorção induzida por eletrões; 3 – emissão secundária de eletrões induzida por raio X; 4 – coleção de eletrões secundários produzidos por raio X.[1]	7
Figura 2.4: Esquematização dos manómetros de ionização cilíndricos: K – cátodo emissor; A – ânodo; C - coletor.[1]	8
Figura 2.5: Representação em corte de um extrator gauge.[1]	9
Figura 2.6: Representação esquemática do manómetro de Helmer e dos potenciais aplicados no mesmo. [1]	9
Figura 2.7: Representação esquemática do manómetro AxTRAN e dos potenciais aplicados no mesmo. [1]	10
Figura 2.8: Representação em corte de um spinning rotor gauge: A – uma de duas bobinas para estabilização da posição vertical do rotor; R – rotor; L – uma de quatro bobinas para estabilização da posição horizontal do rotor; D – uma de quatro bobinas para impor a rotação do rotor; M – um de dois magnetos permanentes para suspensão do rotor; V – tubo de aço inoxidável onde o rotor se encontra; P – uma de duas bobinas para análise da indução criada pela rotação do rotor. [13]	11
Figura 3.1: Vista 3D em corte com cotagem do manómetro “extrator” modelado em SolidWorks.	17
Figura 3.2: Distribuição do comprimento das trajetórias dos eletrões no interior do manómetro “extrator”.	18
Figura 3.3: Representação do número de iões coletados criados em cada região do volume de ionização, utilizando o Modelo 1. A vermelho estão representadas as trajetórias dos iões e a castanho os elétrodos do manómetro “extrator”.	19
Figura 3.4: Energia cinética de um eletrão ao longo da sua trajetória e σ associada para N_2 correspondente ao manómetro “extrator”.	21

Figura 3.5: Representação das partículas no manómetro “extrator” através dos Modelos 1, 2 e 4: a preto encontram-se as trajetórias dos eletrões emitidos pelo cátodo, a vermelho as trajetórias dos iões e a verde os eletrões retrodispersos.	22
Figura 3.6: Sensibilidades obtidas com cada modelo de simulação em função da pressão para o manómetro “extrator” para N ₂ a uma temperatura de 400 K.	23
Figura 3.7: Vista 3D em corte com cotagem do manómetro Bayard-Alpert modelado em SolidWorks.	23
Figura 3.8: Distribuição do comprimento das trajetórias dos eletrões no interior do manómetro Bayard-Alpert.	24
Figura 3.9: Representação do número de iões coletados criados em cada região do volume de ionização. A vermelho estão representadas as trajetórias dos iões e a castanho os elétrodos do manómetro Bayard-Alpert.	25
Figura 3.10: Sensibilidades obtidas com cada modelo de simulação em função da pressão para o manómetro Bayard-Alpert com N ₂ a uma temperatura de 400 K.	26
Figura 3.11: Representação das partículas no manómetro Bayard-Alpert através dos Modelos 1, 2 e 4: a preto encontram-se as trajetórias dos eletrões emitidos pelo cátodo, a vermelho as trajetórias dos iões e a verde os eletrões retrodispersos.	27
Figura 3.12: Trajetória de um único ião antes de ser coletado num manómetro Bayard-Alpert.	28
Figura 3.13: Linhas equipotenciais em torno de um dos arames da rede do manómetro Bayard-Alpert.	28
Figura 3.14: Representação 3D em corte do manómetro linear 16NRM05 e potenciais aplicados a cada elétrodo.	29
Figura 3.15: Ilustração das trajetórias das partículas no interior do manómetro linear 16NRM05; a preto encontram-se representadas as trajetórias dos eletrões e a vermelho dos iões.	30
Figura 3.16: Sensibilidade em função da pressão obtida através do Modelo 2 simulando o manómetro linear 16NRM05 com N ₂ ; T = 400 K.	31
Figura 3.17: Trajetórias dos eletrões emitidos da superfície da gaiola de Faraday com energia de 150 eV.	32
Figura 3.18: Trajetórias dos eletrões emitidos da superfície da gaiola de Faraday com energia de 150 eV.	33
Figura 3.19: Etapas no processo de idealização da coleção de eletrões; representações em SIMION.	34

Figura 3.20: Simulação em SIMION do funcionamento do manómetro cilíndrico depois de definidos os eletrodos a utilizar; a preto encontram-se representadas as trajetórias dos eletrões e a vermelho dos iões.	35
Figura 3.21: Representação final da geometria dos elétrodos, potenciais aplicados e trajetórias; a preto encontram-se representadas as trajetórias dos eletrões e a vermelhos dos iões.	37
Figura 3.22: Superfícies de energia potencial para eletrões no interior do manómetro cilíndrico; a preto encontram-se representadas as trajetórias dos eletrões e a vermelhos dos iões.	37
Figura 3.23: Sensibilidade do manómetro cilíndrico em função da pressão para N_2 ; $T = 300\text{ K}$; $S = 9,02 \pm 0,18\text{ mbar}^{-1}$ para gama de pressão de trabalho do manómetro.	38
Figura 3.24: Representações das trajetórias dos eletrões à saída do cátodo no conjunto emissor inicial: a) vista de topo em corte do cátodo e da caixa que fixação; b) vista tridimensional do conjunto emissor e trajetórias dos eletrões à sua saída.	39
Figura 3.25: Representações das trajetórias dos eletrões à saída do cátodo no conjunto emissor final: a) vista de topo em corte do cátodo e da caixa que fixação; b) vista tridimensional do conjunto emissor e trajetórias dos eletrões à sua saída.	40
Figura 4.1: Representação tridimensional do manómetro cilíndrico (sem a tampa).	44
Figura 4.2: Representação tridimensional em corte do manómetro cilíndrico com o pormenor evidenciando a montagem com isolamento elétrico.	44
Figura 4.3: Representações da rede supressora tal como é produzida e da mesma aplicada no aro de suporte; a rosa encontra-se a rede supressora e a verde o aro de suporte.	45
Figura 4.4: Vista explodida do conjunto de emissão do manómetro cilíndrico.	45
Figura 4.5: Manómetro cilíndrico fixo ao flange e das ligações para contacto elétrico.	46
Figura 4.6: Manómetro cilíndrico produzido e montado sem o conjunto de emissão.	47
Figura 4.7: Manómetro cilíndrico montado após revestimento dos elétrodos com grafite.	47
Figura 4.8: Painel frontal do controlador eletrónico do manómetro cilíndrico.	48
Figura 4.9: Díodo com filamento helicoidal em Rénio.	50
Figura 4.10: Corrente de eletrões extraída do cátodo em função do potencial de extração para cátodos helicoidais em rénio e tungsténio toriado.	51
Figura 4.11: Corrente eletrões extraída do cátodo em função do potencial de extração com o wehnelt montado para os filamentos helicoidal e linear em tungsténio toriado.	52
Figura 5.1: Curva obtida experimentalmente com o manómetro cilíndrico da razão entre a corrente de iões coletada e a corrente de eletrões medida pelo cátodo em função da pressão na câmara.	54

Figura 5.2: Curva de sensibilidade em função da pressão associada ao manómetro cilíndrico; S $= 4,75 \text{ mbar}^{-1}$	54
--	----

Lista de tabelas

Tabela 3.1: Secções eficazes de ionização associadas a cada gás; $E = 100$ eV.	19
Tabela 3.2: Sensibilidade calculada para o manómetro “extrator” através do Modelo 1 de simulação para diferentes gases e temperaturas.	20
Tabela 3.3: Sensibilidade calculada para o manómetro Bayard-Alpert através do Modelo 1 de simulação para diferentes gases e temperaturas.	25
Tabela 3.4: Sensibilidade e livre percurso médio dos eletrões no manómetro 16NRM05 assumindo diferentes deformações da geometria e alterações nos seus potenciais.	31
Tabela 3.5: Razão de eletrões retrodispersos que escapam da gaiola de Faraday do manómetro 16NRM05 em função da sua energia inicial.	32
Tabela 3.6: Sensibilidade do manómetro cilíndrico assumindo diferentes deformações da geometria e alterações nos seus potenciais.	36
Tabela 3.7: Sensibilidade calculada para o manómetro cilíndrico através do Modelo 1 de simulação para diferentes gases e temperaturas.	38
Tabela 5.1: Potenciais aplicados do manómetro cilíndrico experimentalmente.	53

Introdução

1.1 Objetivos e contexto

Os avanços decorridos na geração de alto-vácuo e ultra-alto-vácuo desde as últimas décadas têm sido notáveis. Com este avanço existe a necessidade de desenvolvimento dos manómetros para a medição da pressão. Os manómetros de ionização por cátodo quente são os mais utilizados. Com este tipo de manómetros podem-se fazer medições de pressões entre 10^{-3} mbar e 10^{-10} mbar, quando os limites impostos pela emissão de raios X se tornam dominantes [1]. Estes manómetros revelam-se fundamentais em todos os sistemas onde seja produzido alto vácuo, tanto a nível laboratorial como em produção industrial, sendo estes o único tipo de manómetro que permita medições em ultra-alto vácuo. Contudo, as limitações e desvantagens dos manómetros de ionização por cátodo emissor são conhecidas e estão bem descritas na literatura.

O CEFITEC é um dos parceiros no projeto europeu “EMPIR Towards a documentary standard for an ionisation vacuum gauge”. Este projeto tem como objetivo o desenvolvimento de um manómetro de ionização de elevada estabilidade que permita a medição de alto e ultra-alto vácuo com menor incerteza, minimizando os fenómenos físicos que alteram o correto funcionamento dos manómetros de ionização atuais. O CEFITEC colabora no projeto europeu participando na simulação de manómetros e da caracterização de materiais. Em paralelo com estas atividades, irá propor aos parceiros um novo manómetro cujas especificações e características resultam do presente trabalho de mestrado.

O desenvolvimento de todo o trabalho descrito foi efetuado no laboratório de tecnologia de metrologia de vácuo, Metrovac, e no laboratório de superfícies do CEFITEC.

1.2 Resumo desta tese

O capítulo seguinte descreve o princípio de funcionamento dos manómetros de ionização, a sua história, os vários tipos de medidor e as suas limitações. Descrevem-se em paralelo as fontes de incerteza conhecidas e as suas implicações nas medidas efetuadas. Por fim, são

apresentados valores da variação de sensibilidade medidos experimentalmente em manómetros de ionização.

O Capítulo 3 apresenta as simulações dos vacuómetros em SIMION. Revelou-se necessário um primeiro subcapítulo de descrição dos vários modelos de simulação usados. Cada subcapítulo seguinte descreve os resultados e conclusões retiradas da simulação de um modelo de manómetro. São apresentadas as simulações do manómetro extrator, Bayard-Alpert, linear 16NRM05 e cilíndrico. O subcapítulo final apresenta as conclusões gerais obtidas das simulações.

Depois, no Capítulo 4, é descrita a construção do manómetro cilíndrico, referindo detalhes de montagem e escolha de materiais. Este capítulo aborda o desenvolvimento do controlador eletrónico e o ensaio de cátodos.

Por fim, no Capítulo 5, são apresentados os resultados dos testes preliminares do medidor e conclusões tiradas. O capítulo termina com a descrição do trabalho a ser desenvolvido no futuro.

A medição de alto e ultra-alto vácuo

Neste capítulo começa-se por descrever brevemente a história dos manómetros de ionização. De forma mais extensa, são descritas as técnicas utilizadas atualmente para medição na gama de pressão em que os vacuómetros de ionização de cátodo quente operam. Este capítulo descreve ainda os fenómenos físicos que ocorrem com o funcionamento dos medidores e apresenta alguns estudos descritos na literatura sobre a estabilidade dos vacuómetros.

2.1 Nota histórica sobre os manómetros de ionização de cátodo quente

Os manómetros de ionização tiveram origem em 1909 com a demonstração do uso de um tríodo como manómetro de ionização para vácuo por parte de Adolf von Baeyer [1]. O sistema consistia apenas em 3 elétrodos, com um cátodo emissor de eletrões, um ânodo e um coletor para coletar os iões formados. Mais tarde em 1916, Buckley, através de um melhoramento deste sistema simples conseguiu medir pressões com um limite inferior de 10^{-8} mbar [2]. O esquema básico de um tríodo usado como manómetro de ionização é apresentado na Figura 2.1. No manómetro de ionização de cátodo emissor o potencial do coletor deve ser negativo em relação ao cátodo emissor, para que apenas os iões sejam coletados, visto que os eletrões possuem carga negativa. A energia máxima atingida pelos eletrões neste tipo de manómetros é dada pela diferença de potencial entre o ânodo e o cátodo, devendo ser superior a 100 V para aumentar a probabilidade de ionização dos gases presentes na câmara.

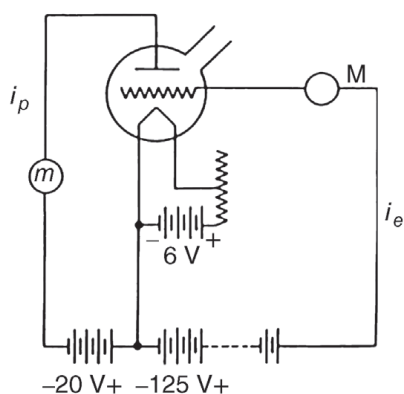


Figura 2.1: Representação esquemática de um triodo usado como manómetro de ionização [1].

Nas décadas seguintes ocorreu um grande progresso nas técnicas de produção de vácuo. No entanto, as medições nunca indicaram pressões abaixo de 10^{-8} mbar. Em 1947, Nottingham levantou a hipótese de existir um efeito resultante de raios X que limitava a pressão mínima medida pelos manómetros de ionização. A hipótese sugeria que a colisão dos eletrões no ânodo criaria a emissão de raios X que ao irradiar o coletor provocaria uma emissão secundária de eletrões, resultando numa corrente igual à produzida por iões. Essa emissão seria constante e como tal justificaria o limite de 10^{-8} mbar. Este efeito foi provado e ultrapassado com a invenção de Bayard e Alpert que consistia num manómetro composto por um coletor, que era apenas um fio no centro de um ânodo cilíndrico em rede. Com a redução da área do coletor diminui-se o efeito de raios X uma vez que se diminui o número de fotões que colidem com o coletor. O manómetro Bayard-Alpert permitiu a medição de pressões até um limite inferior de 10^{-10} mbar e continua a ser utilizado até aos dias de hoje [1].

2.2 Os manómetros de ionização de cátodo quente

2.2.1 Ionização de gases induzida por eletrões

A ionização é um efeito inerente à produção de iões. A colisão de eletrões energéticos com átomos ou moléculas pode provocar a remoção de um eletrão da nuvem eletrónica por transferência de energia deixando o átomo ou molécula positivamente carregado. Para espécies no seu estado fundamental esta energia varia entre 3,89 eV, para o Césio, e 24,59 eV, para o Hélio [3]. A probabilidade de ionização de um gás quando este é alvo de uma colisão com um eletrão é dada pela secção eficaz de ionização, σ . Para a maioria dos gases, a secção eficaz de ionização atinge o seu máximo quando os eletrões que colidem com o gás atingem cerca de 100 eV [4][5][6].

2.2.2 Princípio de medição dos manómetros de ionização

Os manómetros de ionização produzem medições indiretas da pressão, medindo correntes de partículas proporcionais à pressão no seu interior. Os manómetros de ionização de cátodo emissor possuem um filamento aquecido emitindo eletrões que são acelerados, provocando a ionização dos gases existentes na câmara. Os iões criados pela ionização do gás são posteriormente coletados resultando numa corrente que pode ser medida através de eletrómetros.

A corrente de iões medida no coletor de um manómetro de ionização depende diretamente da densidade de partículas dentro da câmara, da corrente de eletrões emitida pelo cátodo, da secção eficaz de ionização e do livre percurso médio dos eletrões dentro do manómetro. A corrente de iões medida I_i , pode então ser dada pela seguinte equação

$$I_i = \sigma L \frac{p}{k_B T} I_e \quad (2.1)$$

onde σ representa a secção de ionização, L o livre percurso médio dos eletrões dentro do manómetro, p a pressão da câmara, k_B a constante de Boltzmann, T a temperatura da câmara, e I_e a corrente de eletrões. A Equação (2.1) é simplificada definindo a sensibilidade como

$$S = \frac{\sigma L}{k_B T} \quad (2.2)$$

resultando na Equação (2.3). [7]

$$I_i = S I_e p \quad (2.3)$$

Apesar de a sensibilidade ser representada na literatura pela Equação (2.2), nesta deve ser incluída a probabilidade de coleção de iões, dado que a corrente de iões criada não é totalmente coletada. Resultando na equação

$$S = \frac{\sigma L}{K_b T} \cdot P_c \quad (2.4)$$

Para as pressões de trabalho de um manómetro de ionização a sensibilidade é uma constante, sendo esta uma relação entre a razão de correntes medidas e a pressão da câmara como mostra a Equação (2.3) e pode ser observado na Figura 2.2. Sabendo também que a corrente eletrões emitidos pelo filamento se mantém constante pode relacionar-se facilmente a corrente de iões medida no coletor com a pressão a que se encontra a câmara.

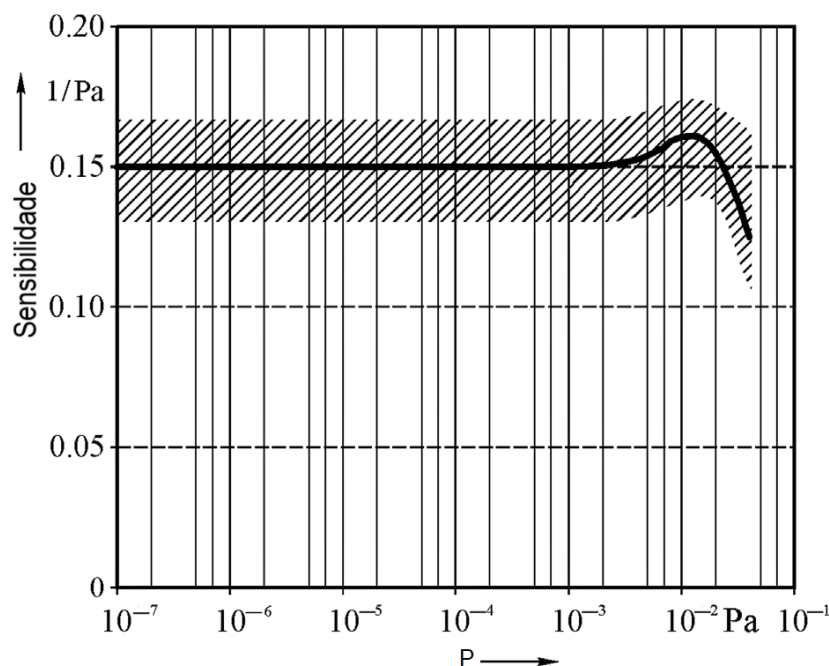


Figura 2.2: Sensibilidade de um manômetro de ionização em função da pressão da câmara[1].

2.2.3 Emissão secundária de elétrons induzida por iões

Quando os iões acelerados colidem com uma superfície estes podem gerar a emissão secundária de elétrons através da transferência de energia. Este efeito é independente da pressão pois o número de elétrons removidos da superfície onde se dá a colisão é proporcional ao número de iões que nela colidem. Nos manómetros de ionização esta emissão secundária pode influenciar de formas distintas a medição de pressão. Uma das consequências da emissão secundária de elétrons é a alteração do sentido da corrente elétrica no elétrodo, que no caso do coletor é crítica visto que a emissão de um elétron tem o mesmo efeito que a receção de um ião na corrente medida. Para além desta alteração, a emissão secundária pode alterar a medida de pressão uma vez que os elétrons emitidos da superfície dos elétrodos podem ser acelerados e provocar ionização adicional dos gases da câmara aumentando a corrente de iões medida no coletor.

2.2.4 Dessorção induzida por elétrons

As superfícies dos materiais, mesmo que submetidas a baixas pressões possuem espécies adsorvidas. Quando os elétrons acelerados colidem com as superfícies pode dar-se a dessorção das espécies adsorvidas. Essas mesmas espécies podem ser emitidas de forma neutra ou ionizada ainda que na sua maioria seja na forma neutra [7]. No caso dos manómetros de ionização este efeito tem uma relevância elevada visto que quando ocorre dessorção existe um aumento da pressão na câmara que dará origem a uma perturbação na medição de pressão [7].

2.2.5 Emissão de raios X

A emissão de raios X é um fenómeno que ocorre quando os eletrões energéticos colidem com a superfície de um elétrodo. Essa emissão é crítica no funcionamento dos manómetros de ionização uma vez que quando esta radiação incide nos elétrodos esta poderá dar origem a um fotoeletrão [8]. A emissão de eletrões dos elétrodos poderá promover a ionização dentro do manómetro aumentando a corrente de iões medida. Quando os raios X colidem com o coletor poderá existir a emissão de fotoeletrões, o que na corrente medida é o equivalente à receção de iões.

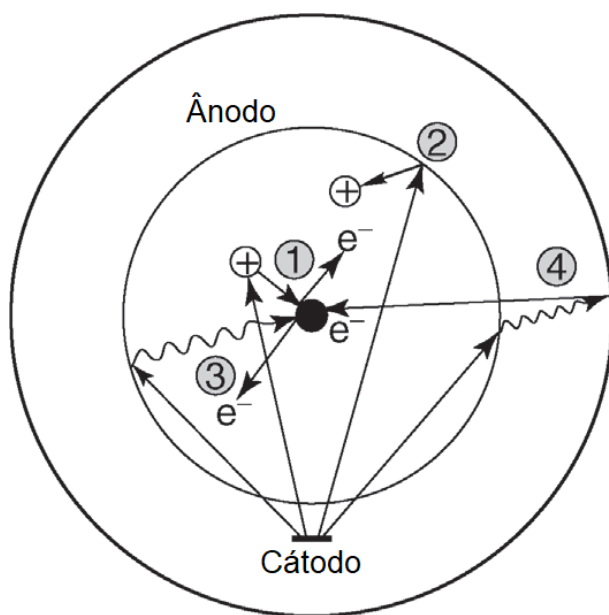


Figura 2.3: Esquemática do manómetro de Bayard-Alpert com representação das emissões internas; 1 - emissão secundária de eletrões induzida por iões; 2 - dessorção induzida por eletrões; 3 - emissão secundária de eletrões induzida por raio X; 4 - coleção de eletrões secundários produzidos por raio X[1].

2.3 Tipos e técnicas de medida atuais

2.3.1 Manómetros de ionização

Existem diversos manómetros de geometria cilíndrica entre os quais o manómetro de ionização tipo tríodo e o manómetro de Bayard-Alpert. Outro tipo de manómetro de ionização de geometria cilíndrica é o *fine vacuum gauge* que permite a medição de pressões mais elevadas com um limite superior de 1 mbar. A geometria deste tipo de medidor é idêntica à do vacuómetro de ionização de tríodo, mas para que se possam medir pressões tão altas de forma linear é permutada a função do coletor e ânodo: através da troca dos seus potenciais o ânodo substitui o coletor e vice-versa. Para operar a pressões tão altas o cátodo emissor é construído em irídio

com um revestimento de óxido de tório fazendo com que seja mais duradouro[1]. Na Figura 2.4 são representados de forma simplificada os 3 tipos de manômetros cilíndricos referidos.

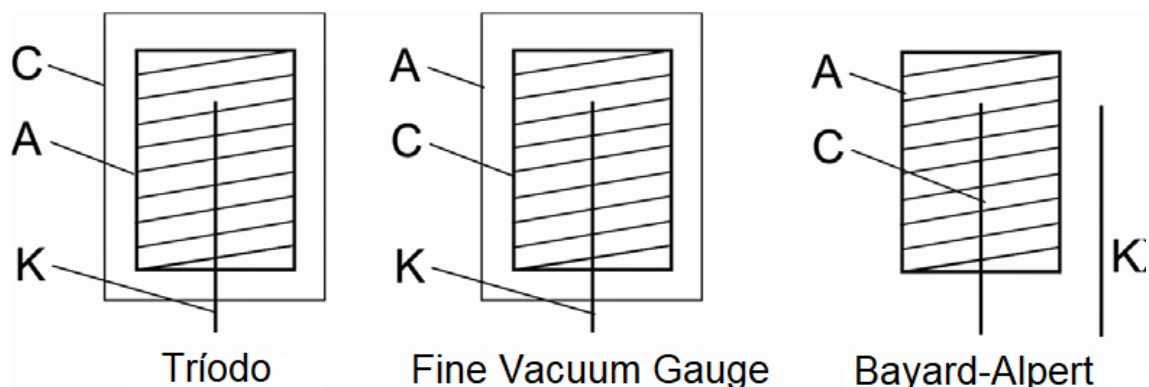


Figura 2.4: Esquematização dos manômetros de ionização cilíndricos: K – cátodo emissor; A – ânodo; C - coletor[1].

Outro tipo de manômetro existente é o “extrator”. Neste tipo de manômetro o coletor está fora do volume de ionização. O objetivo é fazer com que os raios X produzidos no volume de ionização não colidam com o coletor (evitando assim a emissão secundária proveniente dos raios X e diminuir o limite de raios X já mencionado). Na Figura 2.5 está representado um modelo de manômetro “extrator” onde o anel extrator encobre o coletor dos raios X produzidos na colisão dos elétrons com o ânodo. Este é apenas um dos modelos existentes, mas todos eles se baseiam no mesmo princípio, extraíndo os íons da câmara de ionização e direcionando-os para o coletor. Este tipo de manômetros permite a medição de pressões duas ordens de grandeza abaixo dos manômetros de Bayard-Alpert, podendo atingir 10^{-12} mbar. As pressões máximas medidas com este tipo de manômetros foram de 10^{-2} mbar.

Um dos manômetros do tipo extrator mais conhecidos é o manômetro de Helmer, representado na Figura 2.6. Neste manômetro os íons extraídos do volume de ionização descrevem um percurso curvilíneo de 90° através da aplicação de um campo elétrico na sua trajetória antes de colidirem com o coletor [9], [10]. Com este modelo o limite imposto pelos raios X foi novamente reduzido, tendo-se medido pressões da ordem de 10^{-14} mbar.

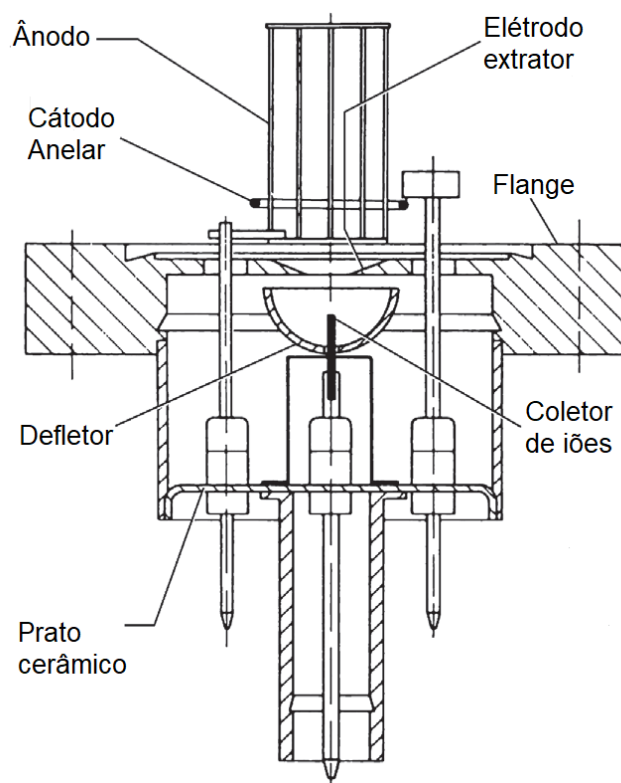


Figura 2.5: Representação em corte de um exctrator gauge[1].

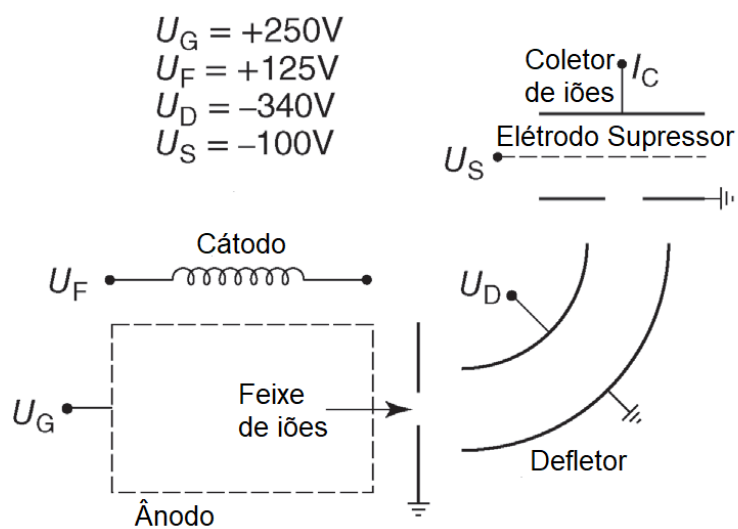


Figura 2.6: Representação esquemática do manómetro de Helmer e dos potenciais aplicados no mesmo[1].

Com os modelos de vacuómetro descritos anteriormente consegue-se eliminar a emissão secundária de eletrões estimulada por raio X, no entanto continua a existir emissão secundária de íões provocada pela colisão de eletrões com o ânodo. Um manómetro que permite atenuar a contribuição deste efeito nas medidas de pressão é o manómetro AxTRAN (axial symmetric

transmission gauge), representado na Figura 2.7 [11]. Neste manómetro os iões são seleccionados em energia após a saída do volume de ionização num analisador de *Bessel*. Variando o potencial U_{BE} podem seleccionar-se os iões criados no volume de ionização e não os provenientes da emissão secundária no ânodo. A pressão mínima medida por estes manómetros estima-se que seja de 3×10^{-14} mbar [12].

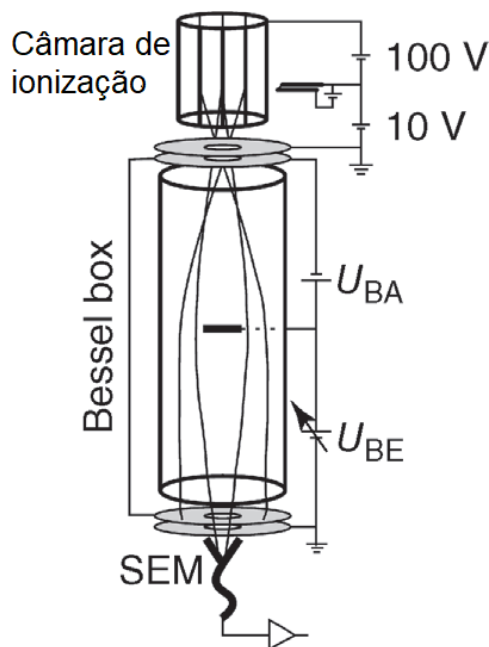


Figura 2.7: Representação esquemática do manómetro AxTRAN e dos potenciais aplicados no mesmo [1].

2.3.2 Spinning rotor gauge (SRG)

O *spinning rotor gauge* consiste num manómetro de alta estabilidade que funciona para pressões numa gama de 1 a 10^{-8} mbar. O elemento sensor do SRG é composto por uma esfera de aço inoxidável, suspensa magneticamente, como ilustrado na Figura 2.8. A esfera é colocada em rotação, através da aplicação de um campo magnético, e quando atinge uma determinada velocidade de rotação, é deixada a girar livremente. As colisões das moléculas de gás com a superfície da esfera proporcionam a sua desaceleração; esta desaceleração é proporcional à pressão na câmara. Como o princípio de medição é mecânico e eletrónico, não existem efeitos de ionização (como ocorre nos manómetros de ionização) que podem influenciar a incerteza das medições, conforme descrito em [13].

Este medidor tem uma elevada estabilidade devido ao facto de existir pouca deterioração das características do rotor pois o atrito existente com o gás da altera muito pouco a sua superfície. Para conservar a superfície do rotor recomenda-se não submeter o manómetro a pressões elevadas. Os SRG são indicados como padrões para verificar a estabilidade de vacuómetros de ionização dado que a elevada estabilidade na medição de pressão.

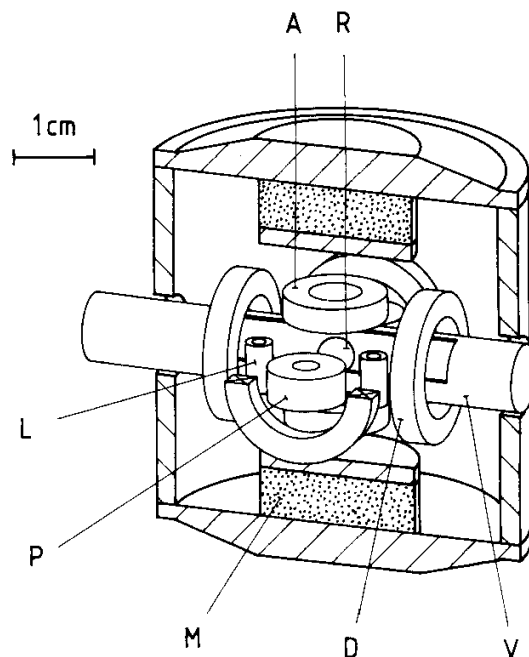


Figura 2.8: Representação em corte de um spinning rotor gauge: A – uma de duas bobinas para estabilização da posição vertical do rotor; R – rotor; L – uma de quatro bobinas para estabilização da posição horizontal do rotor; D – uma de quatro bobinas para impor a rotação do rotor; M – um de dois magnetos permanentes para suspensão do rotor; V – tubo de aço inoxidável onde o rotor se encontra; P – uma de duas bobinas para análise da indução criada pela rotação do rotor[13].

2.3.3 Manómetros capacitivos

Os manómetros capacitivos abrangem parcialmente a gama de trabalho dos manómetros de ionização. Estes medidores são constituídos por um diafragma que está sujeito a um diferencial de pressão; a deformação do diafragma é tanto maior quanto maior a diferença de pressão a que a membrana está sujeita. A esta membrana está acoplado um eléctrodo que forma um condensador em conjunto com um eléctrodo estático. Com a deformação da membrana, a distância entre os eléctrodos do condensador varia, variando a sua capacidade associada. Medindo esta capacidade consegue-se obter uma medida linear da pressão.

Estes vacuómetros possuem uma estabilidade elevada, sendo estes muitas vezes escolhidos como referência para calibração de outros instrumentos. Estes cobrem uma gama desde a pressão atmosférica até 10^{-5} mbar, dependendo do tipo de diafragma aplicado. Para a leitura da pressão mínima, medem-se deflexões do diafragma de apenas 0,4 nm[1].

2.4 Precisão e estabilidade dos manómetros de ionização

Para manómetros Bayard-Alpert existem em média variações de $\pm 15\%$ na sensibilidade. Para estes medidores as leituras de pressão com incerteza melhor que 1% não são atingíveis. Com manómetros não calibrados a incerteza deve estar acima de $\pm 25\%$ [7].

Um estudo da sensibilidade com 20 manómetros de Bayard-Alpert foi efetuado por Filippelli e Abbott [14] calibrando os medidores com intervalos de 1 a 2 anos. Para os manómetros com cátodo de tungsténio, este estudo revelou uma média 3% na variação da sensibilidade registando-se um valor máximo de 12%. Para cátodos de dióxido de tório a média na variação da sensibilidade foi de 6% tendo sido registado um máximo de 18%.

Outro estudo realizado por P. C. Arnold e S. C. Borichevski[15] com 11 manómetros de ionização de filamento de óxido de tório revelou variações entre -57 e +72% na sensibilidade de medidor para medidor ao fim de 4000 horas de trabalho.

A instabilidade dos manómetros de ionização de cátodo emissor é elevada e verifica-se mesmo que em condições cuidadas de trabalho. Os fenómenos que dão origem à instabilidade deste tipo de manómetros têm vindo a ser averiguados, no entanto não se encontra disponível muita literatura que descreva os fenómenos inerentes a essas fontes de instabilidade.

Simulação

Neste capítulo são apresentados os resultados de simulação elaborados para o estudo de 4 manómetros. Os resultados incluem o cálculo da sensibilidade dos medidores para diferentes gases e temperaturas e as variações na sensibilidade ao introduzir deformações nesses medidores. O capítulo descreve ainda a evolução no *design* do manómetro cilíndrico com base nas simulações realizadas.

Embora o princípio físico de funcionamento dos manómetros de ionização seja simples, a ocorrência de fenómenos físicos indesejados contribui para uma grande incerteza na medição da pressão. Para se proceder à identificação e quantificação destes fenómenos é necessário recorrer à simulação computacional dos vacuómetros. As simulações revelam-se assim de extrema importância não só para a compreensão das limitações dos manómetros atuais como para a idealização de novos manómetros de ionização. Desta forma, possibilitam a identificação dos fenómenos indesejados durante a sua operação. As simulações permitem ainda a determinação e previsão de alguns parâmetros característicos, como a sensibilidade.

Ao longo do trabalho desenvolvido foram realizaram-se muitas simulações de diferentes manómetros de ionização, finalizando com a simulação de um novo manómetro de ionização. Para a simulação do funcionamento dos manómetros de ionização foi usado o *software* SIMION, nas suas versões 8.0 e 8.1.

O SIMION é um *software* de simulação de ótica de partículas carregadas que permite o cálculo de campos elétricos e magnéticos no espaço e efetua o cálculo das trajetórias de partículas carregadas ao atravessarem esses campos. Após a definição da geometria dos elétrodos e dos potenciais aplicados, o SIMION calcula os potenciais num determinado volume resolvendo a equação de Laplace numa rede de pontos que preenche todo esse volume de simulação[16]. O SIMION, nas suas versões mais recentes, permite a importação da geometria dos elétrodos, previamente definida através de um programa de CAD. Depois de definidos os potenciais no espaço é necessário definir as condições iniciais das partículas cujas trajetórias serão simuladas. O programa permite depois a simulação das trajetórias e guarda em ficheiros de texto informação referente às partículas ao longo do percurso.

3.1 Metodologia aplicada nas várias simulações

3.1.1 Definição da geometria e das condições iniciais

A geometria dos elétrodos de cada modelo de vacuómetro simulado foi definida no *software* de CAD SolidWorks e exportadas em ficheiros STL para que estes pudessem ser importados para o SIMION. Ao ser importada a geometria foi criada uma rede cúbica de pontos formando um volume de simulação. O número de pontos da rede é definido aquando da importação, especificando o número de pontos por milímetro pretendido. Este número de pontos foi para todas as geometrias igual ou superior a 10 para permitir descrever os detalhes com algum pormenor. Para cada geometria foram calculados os potenciais elétricos no espaço ao longo da rede de pontos através da resolução da equação de Laplace de forma iterativa, sendo guardado um valor de potencial elétrico em cada ponto da rede. Para o cálculo foi usado um limite de convergência de 5 mV. Para verificar que este limite de convergência era adequado às simulações a realizar foram calculados previamente os potenciais com limites de convergência de 5 μ V e 5 nV. Os resultados das simulações com limites de convergência inferiores foram idênticos, pelo que o limite de convergência de 5 mV foi usado para todas as geometrias simuladas neste trabalho.

Para a simulação de cada medidor foram definidas também as condições iniciais das partículas no interior do manómetro: a massa, carga, posição inicial em relação ao referencial da simulação, energia cinética e direção e sentido da velocidade inicial. Dado que os manómetros de ionização têm cátodos emissores com geometrias diversas e que estes se encontram em locais distintos no seu interior, para a definição das condições iniciais dos eletrões foi necessário criar algoritmos auxiliares para que a emissão fosse aleatória e uniformemente distribuída ao longo da superfície dos filamentos. Estes algoritmos foram escritos na linguagem Python.

3.1.2 Modelos aplicados nas simulações

Dado que a simulação dos manómetros de ionização consiste na produção de uma corrente de eletrões junto ao cátodo emissor e medição da corrente de iões que atinge o coletor, é necessária a simulação da ionização dos gases no interior do manómetro. O SIMION não permite a simulação autónoma do fenómeno de ionização assim como de outros fenómenos de emissão secundária, requerendo uma abordagem mais complexa por parte do utilizador. Assim sendo, foram criados 4 modelos de simulação, nos quais o funcionamento dos manómetros é simulado de forma diferente e tendo por base diferentes aproximações dos fenómenos físicos.

3.1.2.1 Modelo 1: primeira aproximação

O primeiro modelo consiste em simular das trajetórias dos eletrões e com base nessas trajetórias efetuar uma segunda simulação com as trajetórias dos iões. Nesta primeira etapa é

medido o livre percurso médio dos eletrões no interior do manómetro e em segundo lugar a eficiência de coleção dos iões criados. São simuladas inicialmente as trajetórias dos eletrões e guardadas as coordenadas. Esses dados são tratados medindo o livre percurso médio dos eletrões. Por cada eletrão é selecionada uma posição aleatória ao longo da sua trajetória e é gerado um ião nessa mesma posição na segunda simulação, correspondente à simulação das trajetórias de iões. As trajetórias dos iões são novamente guardadas e é calculado o número de iões que atingem o coletor.

Este modelo permite estimar a sensibilidade de qualquer manómetro de ionização para qualquer gás desde que se conheça a secção eficaz de ionização e a sua temperatura. Esta aproximação possui algumas limitações associadas; a criação dos iões não representa totalmente a realidade pois os iões não têm igual probabilidade de formação ao longo de toda a trajetória dos eletrões. Para além desta limitação, este modelo despreza também outros fenómenos físicos como as diversas emissões secundárias.

3.1.2.2 Modelo 2: simulação da ionização com secção eficaz de ionização constante

Num manómetro de ionização, a pressões menores que 10^{-5} mbar, a probabilidade de um eletrão acelerado criar um ião é muito pequena. Para que estatisticamente o número de iões gerados fosse superior a 1 era necessário criar um número de eletrões demasiado elevado. O Modelo 2 foi criado a pensar nesta limitação e fez uso da funcionalidade do SIMION de correr *scripts* escritos em LUA em paralelo com a simulação, proporcionando simulações mais elaboradas. Este modelo consiste na geração de iões ao longo das trajetórias dos eletrões por métodos de Monte Carlo. Fez-se corresponder a cada trajetória de eletrão um número de eletrões, N . Desta forma, cada trajetória passou a representar um feixe de N eletrões aumentando a probabilidade de formação de um ião. O valor de N é ajustado de forma que apenas seja provável a criação de um ião por trajetória. Esta definição deve-se à limitação do SIMION de não se conseguir transformar um eletrão em mais de um ião ao longo da sua trajetória. Nesta simulação, assume-se que a secção eficaz de ionização, σ , é constante e correspondente a uma energia cinética dos eletrões de 100 eV. Em cada passo ao longo das trajetórias dos eletrões é calculada a probabilidade de ionização e, em caso favorável, ocorre esse fenómeno. Quando se dá a ionização, o eletrão é transformado num ião, sendo-lhe alterada a massa, a carga e a velocidade. Para a sua velocidade é gerado um valor de acordo com a distribuição de Maxwell-Boltzmann. Posteriormente, a trajetória dos iões é seguida, verificando se estes atingem o coletor.

Neste modelo é determinado o número de iões coletados e o número correspondente de eletrões gerados, que corresponde ao número de trajetórias de eletrões criadas multiplicado por N . Através destes dois valores é possível calcular a sensibilidade do manómetro aplicando a Equação (2.3). Este modelo permite a simulação de diversos gases, assim como a variação da temperatura a que se encontra o sistema.

Neste modelo assume-se que a secção eficaz de ionização, σ , é constante ao longo de toda a trajetória dos eletrões. Esta é uma aproximação aceitável para a maioria dos modelos de manómetro de ionização, pois a energia dos eletrões no seu interior é tipicamente próxima 100 eV. Para além disso, σ na maioria dos gases atinge o seu máximo para essa mesma energia como referido anteriormente.

3.1.2.3 Modelo 3: simulação da ionização com secção eficaz de ionização variável

Em alguns medidores os eletrões estão sujeitos a elevadas variações de energia, como é o caso do manómetro de Bayard-Alpert, em que se revela ser necessário uma simulação mais apropriada. Para tal, foi implementado um terceiro modelo em que σ é variável ao longo de cada trajetória, sendo esta calculada através da energia dos eletrões em cada passo.

No Apêndice 1 está descrito detalhadamente o modelo físico utilizado na simulação da ionização através do modelo de Monte Carlo.

3.1.2.4 Modelo 4: introdução do fenómeno de retrodispersão dos eletrões

Com a aplicação do Modelo 3, a simulação da ionização existente nos vacuómetros ficou mais próxima da realidade. Contudo, outros fenómenos físicos ocorrem no interior dos manómetros de ionização. Um desses fenómenos é a emissão secundária de eletrões retrodispersos na superfície dos elétrodo, quando estes são atingidos pelos eletrões emitidos pelo cátodo. Em alguns dos medidores este fenómeno não é crítico para a medição de pressão, mas para outros, estima-se que contribua em cerca de 10% para o sinal de pressão, sendo este valor apenas uma estimativa científica[17][18]. Neste Modelo 4, determina-se a probabilidade de um eletrão ser retrodisperso através da energia e ângulo de incidência proveniente da colisão de um eletrão com um dos elétrodo. Para o cálculo dessa probabilidade foram utilizados os resultados obtidos através de simulações de Monte Carlo no programa Casino referente à produção de eletrões retrodispersos em Molibdénio. Com base nesse estudo foi utilizada a expressão

$$BSY = \frac{0,22}{\cos^{0,85}(\alpha)} \quad (3.1)$$

onde BSY representa a taxa de produção de eletrões retrodispersos (backscattering yield) e α o ângulo formado pela velocidade do eletrão incidente e a normal à superfície do elétrodo. Através desta expressão, é calculada a probabilidade de retrodispersão sempre que um eletrão colide com um elétrodo. Em caso favorável, dá-se a retrodispersão, alterando-se a direção e sentido da velocidade do eletrão incidente com base na velocidade inicial.

3.2 Simulações de um manómetro “extrator” (extractor gauge)

O primeiro vacuómetro a ser simulado teve o objetivo de comparar os resultados dos vários simuladores utilizados pelos parceiros do projeto europeu para verificar a sua aptidão para o projeto. Cada parceiro do projeto usou um simulador diferente, sendo que o CEFITEC-FCT/UNL contribuiu com as simulações realizadas em SIMION. O manómetro escolhido para a verificação das capacidades do simulador e dos modelos de simulação utilizados foi o “extrator”.

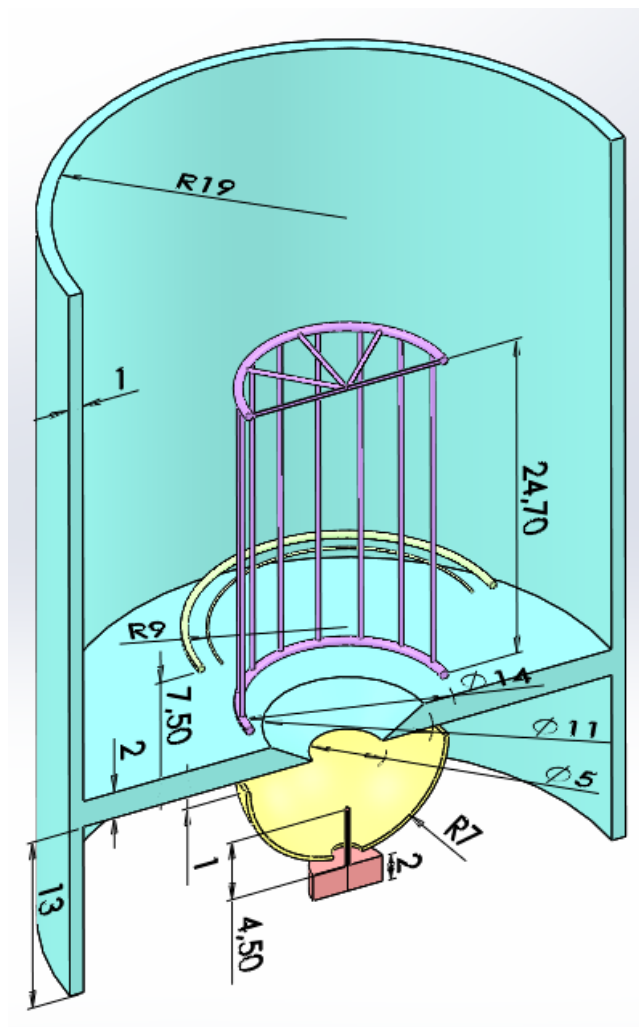


Figura 3.1: Vista 3D em corte com cotagem do manómetro “extrator” modelado em SolidWorks.

A geometria do manómetro foi definida com as dimensões especificadas, como se pode observar na Figura 3.1. A geometria foi importada para o SIMION e foram definidas as condições iniciais dos eletrões de forma a que estes fossem emitidos pelo cátodo nas condições descritas no subcapítulo 3.1.

O Modelo 1 de simulação, descrito anteriormente, permitiu estimar a sensibilidade deste medidor. Numa primeira fase verificou-se o livre percurso médio dos eletrões desprezando as

colisões destes com o gás no interior do manómetro e obteve-se uma distribuição das distâncias percorridas pelos eletrões no interior do manómetro, como se descreve na Figura 3.2. O livre percurso médio dos eletrões para o manómetro extrator foi de 45,17 mm. Como se pode observar pela distribuição de comprimentos de trajetória, muitos dos eletrões colidem antes de percorrerem 5 mm, o que corresponde aos eletrões que colidem com a rede, ânodo, logo na primeira passagem, não chegando a entrar no volume onde a formação dos iões poderá ser coletável.

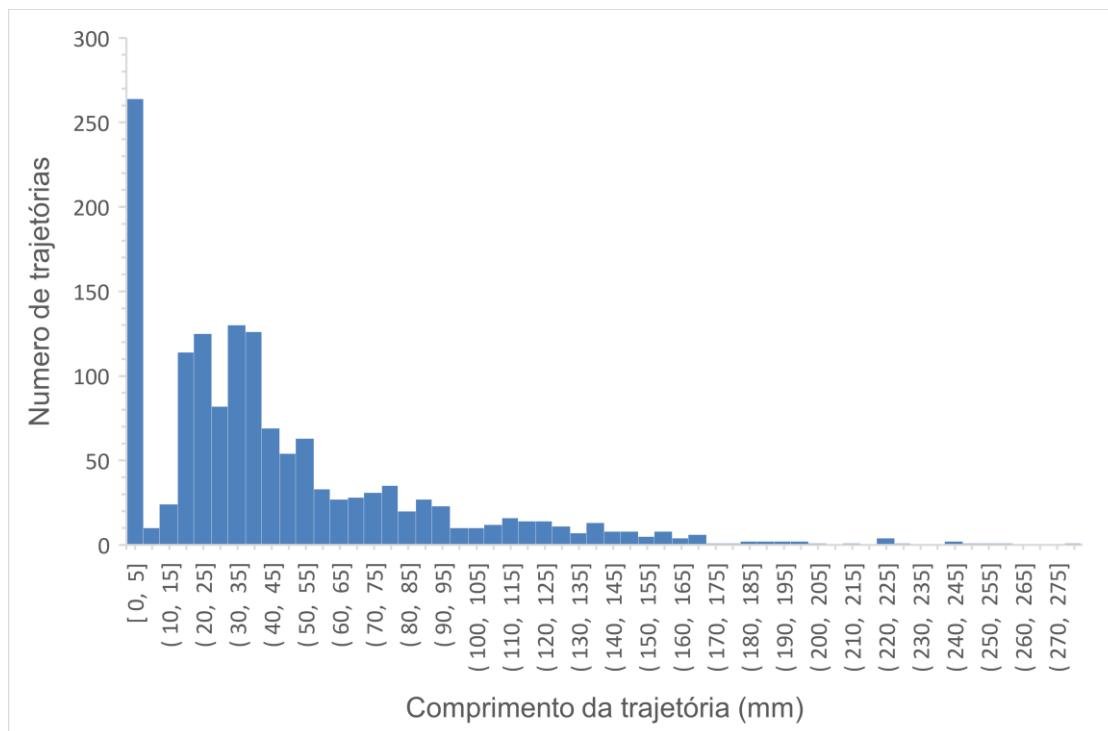


Figura 3.2: Distribuição do comprimento das trajetórias dos eletrões no interior do manómetro "extrator".

Foram simuladas as trajetórias dos iões no interior do manómetro, permitindo assim calcular a eficiência de coleção (razão do número iões que atingiram o coletor e o número de iões criados) obtendo-se uma eficiência de coleção de 36%. Verifica-se que esta baixa eficiência se deve ao facto de os iões criados fora da rede (ânodo) não serem coletados. Foram ainda calculados os iões coletados provenientes de cada zona do volume de ionização, permitindo identificar quais as zonas com maior eficiência. Com esta análise verificou-se que nas regiões 1, 2 e 3 do volume de ionização existe a maior eficiência de coleção, representado na Figura 3.3.

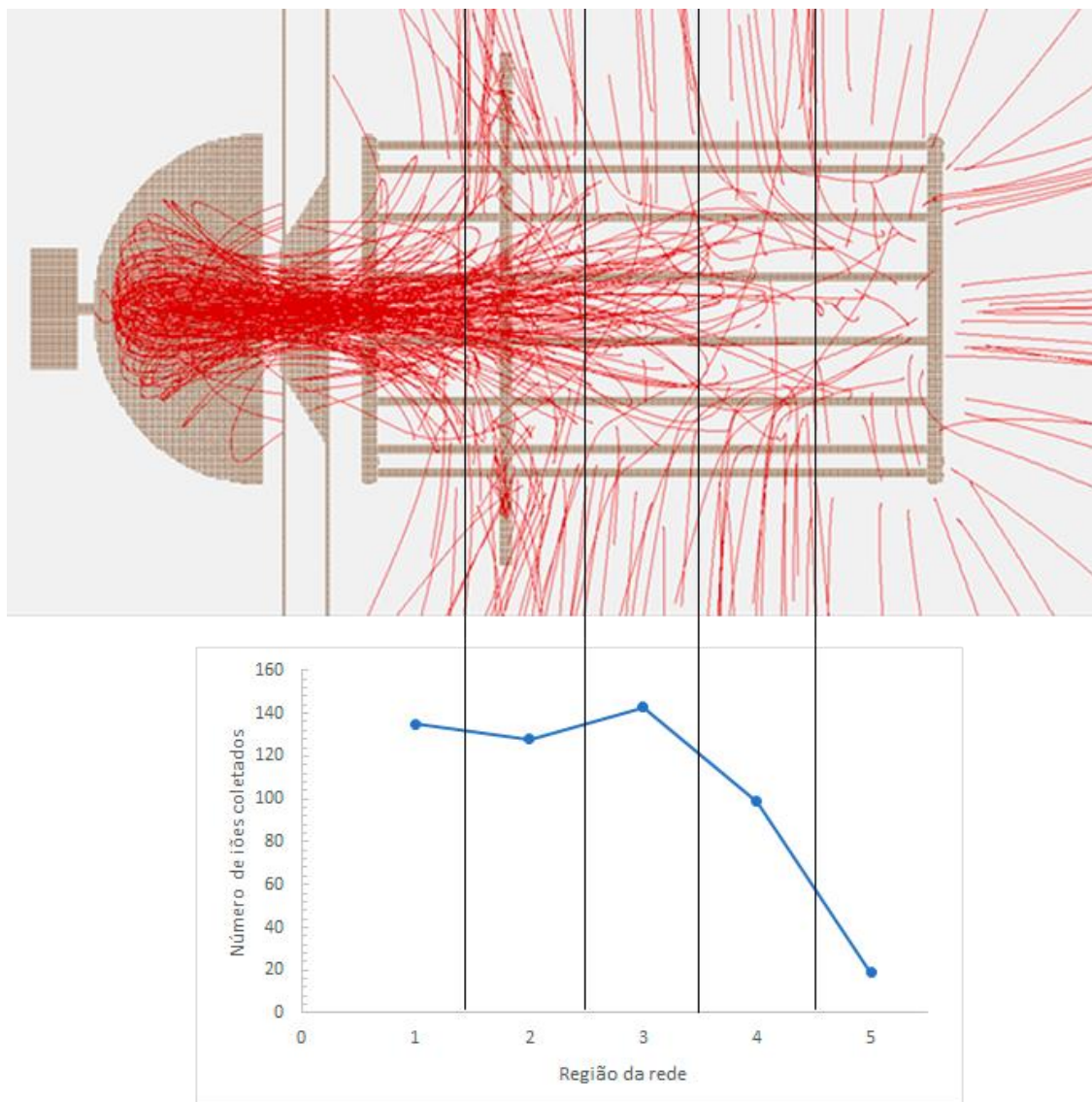


Figura 3.3: Representação do número de íons coletados criados em cada região do volume de ionização, utilizando o Modelo 1. A vermelho estão representadas a trajetórias dos íons e a castanho os eletrodos do manómetro “extrator”.

Os resultados obtidos com o Modelo 1 permitiram também estimar a sensibilidade associada ao manómetro “extrator”, para cada gás a temperaturas diferentes, através da Equação (2.4), incluindo a eficiência total de coleção dos íons. As secções eficazes de ionização, σ , para cada gás foram obtidas através do NIST [20], apresentadas na Tabela 3.1. As sensibilidades obtidas podem ser consultadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.1: Secções eficazes de ionização associadas a cada gás; $E = 100$ eV.

Gás	N ₂	H ₂	He
σ (10 ⁻²⁰ m ²)	2,615	0,969	0,367

Tabela 3.2: Sensibilidade calculada para o manómetro “extrator” através do Modelo 1 de simulação para diferentes gases e temperaturas.

T(K)	Sensibilidade (mbar ⁻¹)		
	N ₂	H ₂	He
300	10,40	3,86	1,46
373	8,35	3,10	1,17
400	7,79	2,89	1,10
423	7,37	2,74	1,04

As sensibilidades obtidas para o azoto são as mais elevadas devido à sua secção eficaz ser a mais elevada. Verifica-se também que a sensibilidade decresce com o aumento da temperatura, tal como era expectável, sendo estas inversamente proporcionais. Medições experimentais efetuadas com manómetros do tipo “extrator” revelam uma sensibilidade de 6,25 mbar⁻¹ [21]. Dado que a atmosfera é maioritariamente composta por azoto, as sensibilidades obtidas por simulação revelaram estar próximas da sensibilidade medida experimentalmente.

A aplicação do Modelo 2 de simulação permitiu contabilizar os iões recebidos no coletor do manómetro variando a pressão com diferentes gases e temperaturas. Fazendo uso dos resultados obtidos com este modelo, sabendo o número de eletrões emitidos, o número de iões coletados e a pressão a que foi simulado o manómetro, foi possível calcular a sensibilidade do manómetro através da Equação (2.3). Tal como seria expectável, tratando-se de um manómetro de ionização de cátodo quente, a sensibilidade manteve-se constante em toda a gama de pressão de trabalho. A sensibilidade obtida através do Modelo 2 para N₂ a uma temperatura de 400 K foi em média de 7,37 mbar⁻¹, 5% abaixo do valor obtido pelo Modelo 1.

Na tentativa de compreender a variação da probabilidade de ionização, registou-se a energia de um eletrão ao longo da sua trajetória no interior do manómetro e foi calculada σ para N₂, conforme se ilustra na Figura 3.4. Como se pode observar a energia varia significativamente ao longo da trajetória do eletrão, não se mantendo sempre próxima dos 100 eV como foi assumido neste Modelo 2. Os mínimos de energia abruptos que se observam, acontecem quando os eletrões passam para fora da rede. Nesta zona, mesmo que produzam iões, estes não serão coletados. Ainda assim, mesmo dentro do volume coletável, a energia tem pequenas variações.

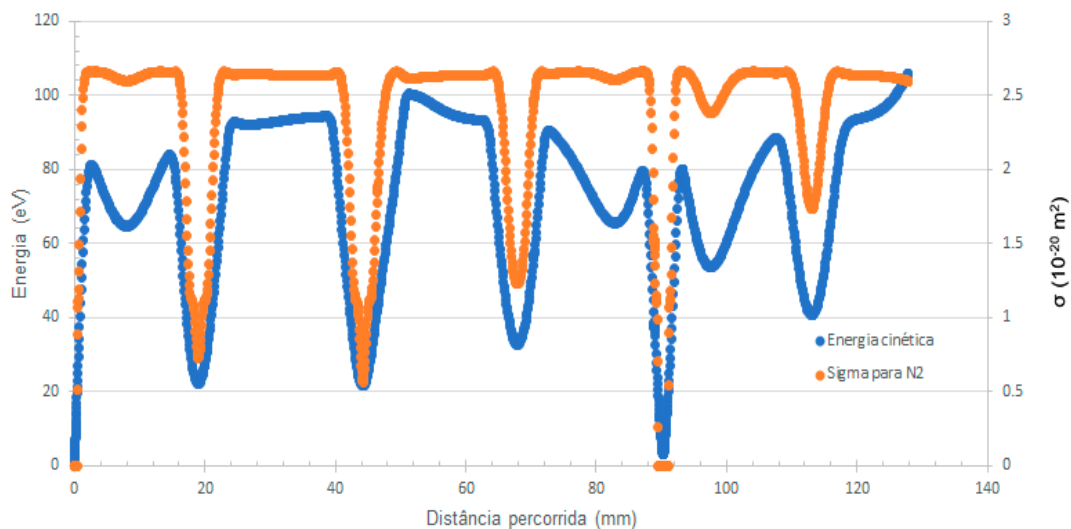


Figura 3.4: Energia cinética de um eletrão ao longo da sua trajetória e σ associada para N₂ correspondente ao manómetro “extrator”.

Para que a sensibilidade fosse calculada de forma mais exata foi utilizado o Modelo 3 que já tem em consideração as alterações na energia dos eletrões para o cálculo da probabilidade de ionização. Com este modelo, e reproduzindo as condições de simulação, obteve-se uma sensibilidade média de 7,69 mbar⁻¹ verificando-se uma subida em comparação com os resultados obtidos anteriormente.

Na tentativa de comprovar a estimativa científica da influência dos eletrões retrodispersos na sensibilidade dos vacuómetros, foi efetuada a simulação do manómetro extrator aplicando o Modelo 4. Com este modelo obteve-se uma sensibilidade de 8,49 mbar⁻¹ para N₂ também a 400 K. Verifica-se que a sensibilidade aumenta em cerca de 10% quando se considera o fenómeno de retrodispersão dos eletrões no interior do manómetro, confirmando assim a expectativa. Na Figura 3.5 podem ser observadas as trajetórias das partículas no interior do vacuómetro para os Modelos 1, 2 e 4. No Modelo 1 apenas é possível representar as trajetórias dos eletrões emitidos pelo cátodo, a preto; no Modelo 2 observam-se também os iões criados, a vermelho; no Modelo 4 encontram-se trajetórias dos eletrões retrodispersos, a verde. O Modelo 3 produz trajetórias idênticas às do Modelo 2.

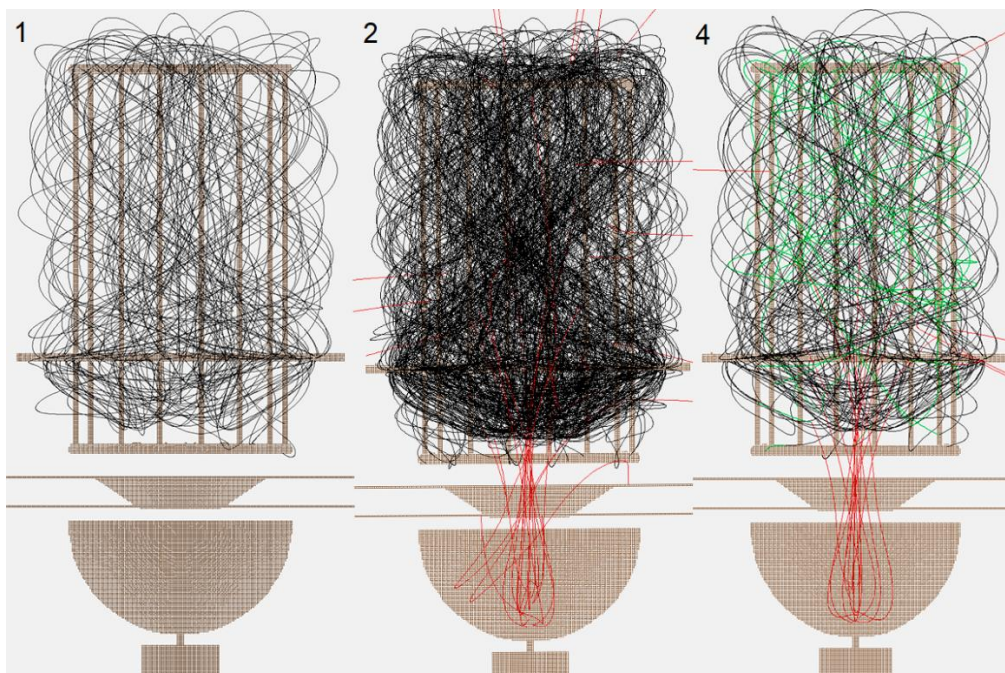


Figura 3.5: Representação das partículas no manómetro “extrator” através dos Modelos 1, 2 e 4: a preto encontram-se as trajetórias dos eletrões emitidos pelo cátodo, a vermelho as trajetórias dos iões e a verde os eletrões retrodispersos.

Na Figura 3.6 estão representadas as sensibilidades em função da pressão obtidas com cada modelo de simulação e o valor experimental, $6,25 \text{ mbar}^{-1}$ [21]. Como se pode observar as sensibilidades obtidas em simulação estão todas acima do valor medido. A causa mais provável é o desconhecimento da temperatura real do medidor durante o seu funcionamento, sugerindo que o valor real é mais elevado que o usado em simulação. Um aumento na temperatura irá implicar uma diminuição da sensibilidade obtida porque a sensibilidade é inversamente proporcional à temperatura, como se verifica pela Equação (2.2).

O intervalo de temperatura que foi considerado nas simulações foi estimado com base na temperatura ambiente e no aquecimento de todo o volume produzido pelo filamento muito quente. Embora esta temperatura seja difícil de medir, já se realizaram tentativas experimentais que serviram de base para os valores usados. No entanto, é bem provável que o valor seja mais elevado, aproximando ainda mais os valores obtidos dos valores experimentais.

A introdução da ionização considerando σ dependente da energia aumentou em cerca de 4% a sensibilidade obtida para o manómetro “extrator” e a introdução do fenómeno de retrodispersão nas simulações aumentou a sensibilidade em cerca de 10%.

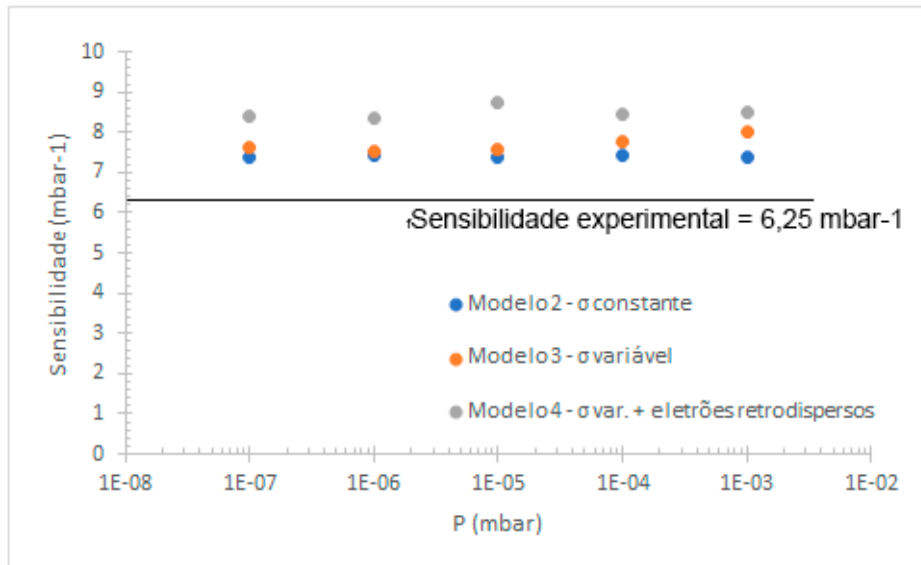


Figura 3.6: Sensibilidades obtidas com cada modelo de simulação em função da pressão para o manômetro “extrator” para N_2 a uma temperatura de 400 K.

3.3 Simulação de um manômetro Bayard-Alpert

Constatou-se que as simulações referentes ao manômetro “extrator” estavam em concordância com as medições experimentais, contudo, em comparação com os resultados obtidos em simulação por outros grupos de investigação envolvidos no projeto europeu, existiam algumas discrepâncias. Desta forma, optou-se por fazer a simulação do manômetro Bayard-Alpert, simulado anteriormente pelo grupo do CERN e publicado em [22].

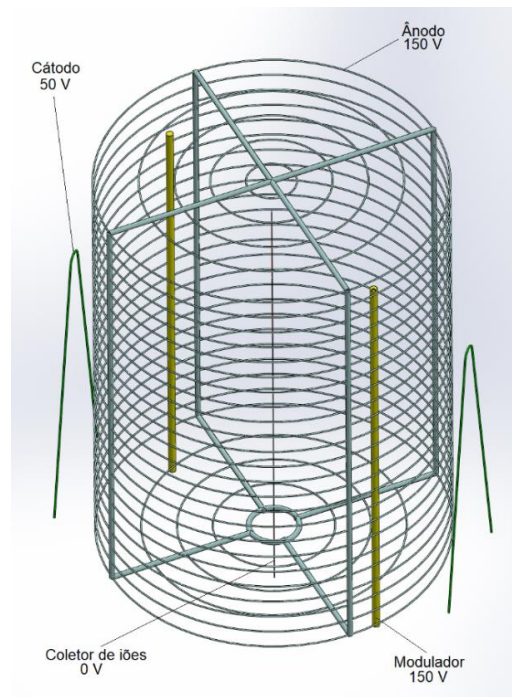


Figura 3.7: Vista 3D do manômetro Bayard-Alpert modelado em SolidWorks.

As simulações efetuadas seguiram as condições do artigo publicado, nomeadamente as dimensões dos eléctrodos, os potenciais aplicados e as condições iniciais das partículas emitidas, conforme representado na Figura 3.7. Foram feitos os ajustes necessários para simulação em SIMION, através dos modelos descritos anteriormente.

À semelhança das simulações do manómetro “extrator”, inicialmente foi utilizado o Modelo 1 de simulação, que deu um livre percurso médio para os eletrões de 87.27 mm. Na Figura 3.8 pode observar-se a distribuição de distâncias percorridas pelos eletrões. Utilizando as trajetórias dos eletrões, foi feita a simulação das trajetórias dos iões e verificou-se uma eficiência de coleção de iões de 44%. A distribuição de iões coletados criados ao longo do volume de ionização encontra-se representada na Figura 3.9.

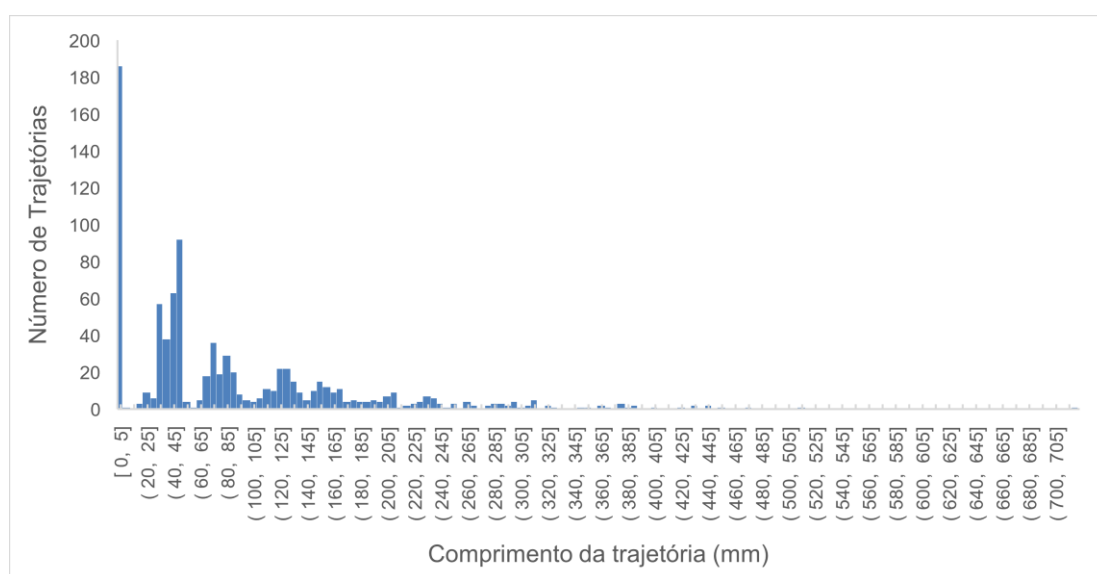


Figura 3.8: Distribuição do comprimento das trajetórias dos eletrões no interior do manómetro Bayard-Alpert.

Com estes resultados, calculou-se a sensibilidade do manómetro para diversos gases a várias temperaturas, com a utilização da Equação (2.4), como se pode observar na Tabela 3.3. Para o cálculo da sensibilidade foram usadas as mesmas secções eficazes de ionização, descritas na Tabela 3.1. Verificou-se novamente a maior sensibilidade associada ao N₂ e um decréscimo da sensibilidade com o aumento da temperatura.

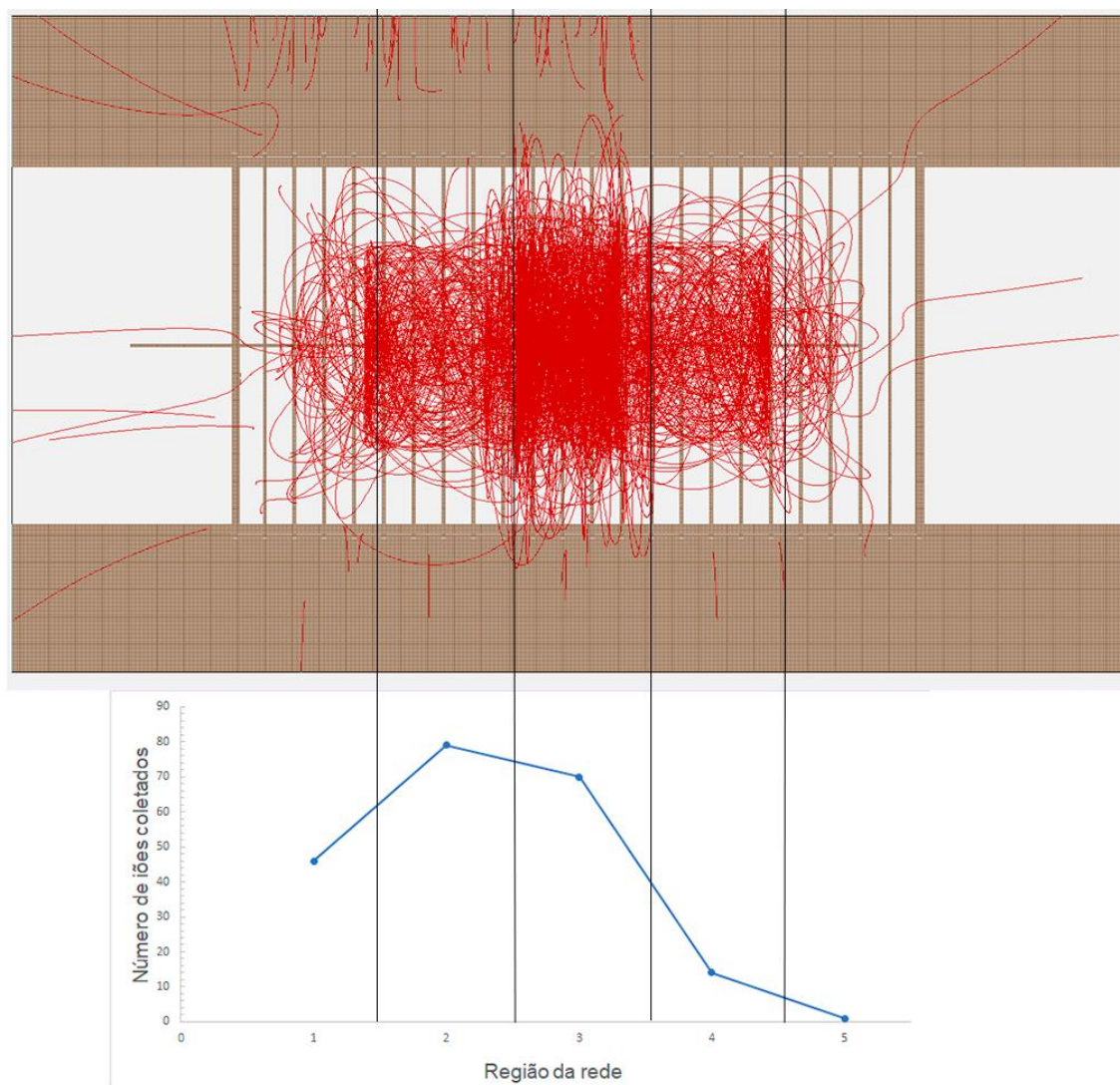


Figura 3.9: Representação do número de íons coletados criados em cada região do volume de ionização. A vermelho estão representadas as trajetórias dos íons e a castanho os elétrodos do manómetro Bayard-Alpert.

Tabela 3.3: Sensibilidade calculada para o manómetro Bayard-Alpert através do Modelo 1 de simulação para diferentes gases e temperaturas.

T(K)	Sensibilidade (mbar ⁻¹)		
	N ₂	H ₂	He
300	24,38	9,03	3,42
373	19,60	7,26	2,75
400	18,28	6,77	2,57
423	17,29	6,41	2,43

Aplicando o Modelo 2 nas simulações, obteve-se o valor da sensibilidade S , do manómetro para azoto a uma temperatura de 400 K na gama de pressões de trabalho do manómetro, 10^{-9} a 10^{-3} mbar. A média da sensibilidade obtida foi de $20,31 \text{ mbar}^{-1}$, cerca de 11% superior à obtida pelo Modelo 1.

Os manómetros “extrator” e Bayard-Alpert dispõem de uma rede que tem a função de ânodo à volta da qual os eletrões se movem. Tal como se verificou para o manómetro “extrator”, também no Bayard-Alpert a energia dos eletrões varia consideravelmente ao longo da sua trajetória. Este facto levou à utilização do Modelo 3, que tem em conta a energia variável dos eletrões no cálculo ionização. Efetuando as simulações para o mesmo gás e temperatura, obteve-se uma sensibilidade média de $21,07 \text{ mbar}^{-1}$. A sensibilidade aumentou em cerca de 4% ao considerar um modelo mais realista no fenómeno de ionização.

O Modelo 4 foi utilizado para contabilizar o efeito de emissão de eletrões retrodispersos, verificando-se que a sensibilidade aumentou para $24,23 \text{ mbar}^{-1}$, correspondendo a um aumento de cerca de 13% em relação à sensibilidade obtida através do Modelo 3. Na Figura 3.10 encontram-se as curvas de sensibilidade obtidas com cada modelo em função pressão para um N_2 a uma temperatura de 400 K.

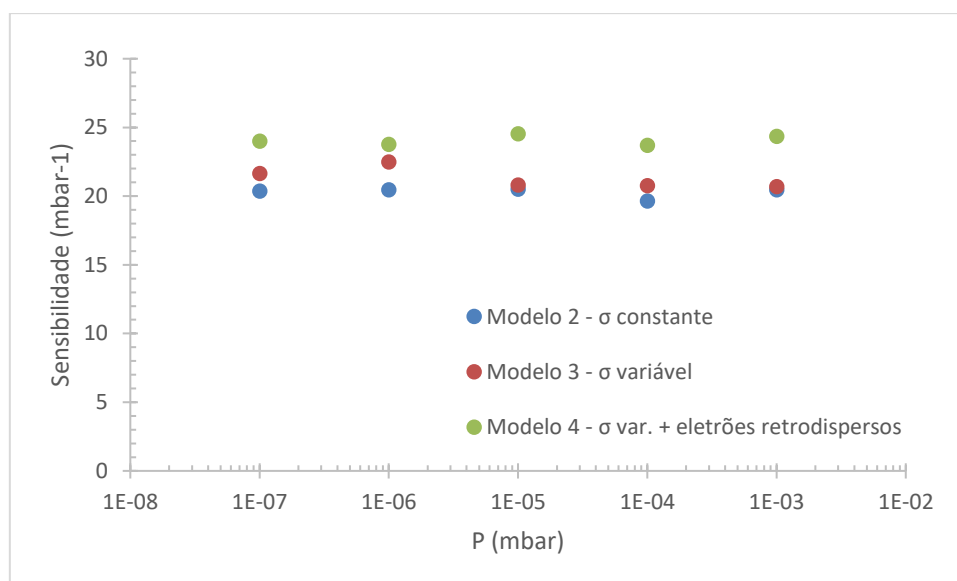


Figura 3.10: Sensibilidades obtidas com cada modelo de simulação em função da pressão para o manómetro Bayard-Alpert com N_2 a uma temperatura de 400 K.

Na Figura 3.11 estão representadas as trajetórias das partículas no interior do vacuómetro para os Modelos 1, 2 e 4 de simulação. No Modelo 1 apenas se observam as trajetórias dos eletrões emitidos pelo cátodo, a preto; no Modelo 2 observam-se também os iões criados, a vermelho; no Modelo 4 encontram-se trajetórias dos eletrões retrodispersos, a verde. Na figura, as quatro secções de um cilindro em torno da rede não representam quatro elétrodos.

Estas advêm do corte retangular do envelope no simulador para que possa ser observado o interior do medidor.

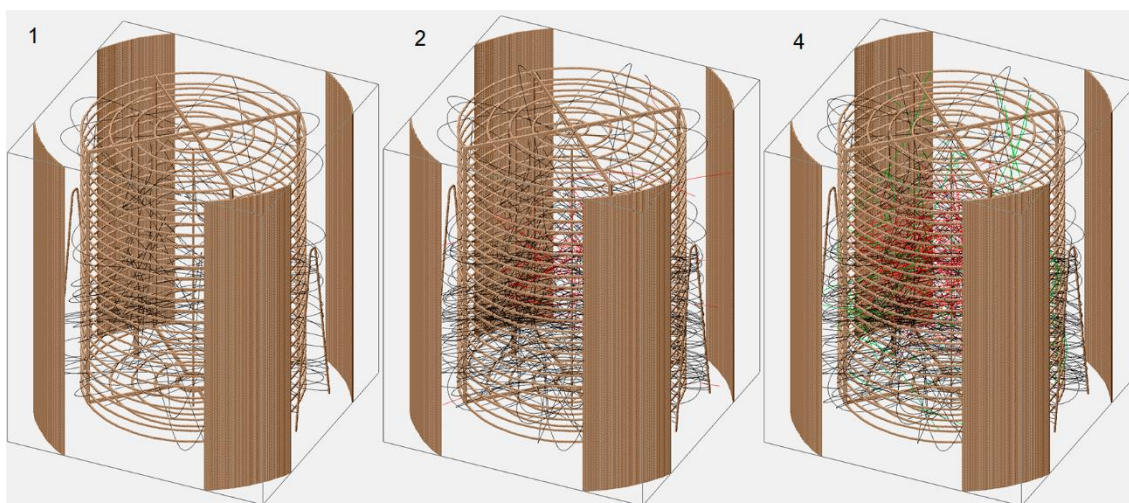


Figura 3.11: Representação das partículas no manómetro Bayard-Alpert através dos Modelos 1, 2 e 4: a preto encontram-se as trajetórias dos eletrões emitidos pelo cátodo, a vermelho as trajetórias dos iões e a verde os eletrões retrodispersos.

Com as simulações efetuadas do manómetro Bayard-Alpert verificou-se a mesma tendência obtida para o manómetro “extrator”. A sensibilidade aumentou ao considerar a variação da secção eficaz ao longo das trajetórias e aumentou de novo ao considerar o fenómeno de retrodispersão dos eletrões tal como obtido para o manómetro “extrator”. Verificou-se ainda que para o manómetro Bayard-Alpert a contribuição do fenómeno de retrodispersão dos eletrões para a sensibilidade é superior aos 10% como estimado na literatura.

A sensibilidade do vacuómetro Bayard-Alpert medida experimentalmente é de $30,8 \text{ mbar}^{-1}$ [22]. A sensibilidade obtida pelas simulações é cerca de $24,2 \text{ mbar}^{-1}$ [22], sendo 21% inferior ao medido experimentalmente. As simulações efetuadas pelo CERN indicaram uma sensibilidade de $38,0 \text{ mbar}^{-1}$, 23% superior ao resultado das medições experimentais.

A nossa simulação foi efetuada para uma temperatura de 400 K. Não é provável que a temperatura no interior do vacuómetro seja inferior a esse valor, o que resultaria numa sensibilidade superior. Portanto a origem da diferença de resultados não deverá ser por desconhecimento da temperatura exata do gás dentro do manómetro. No entanto, verificou-se que neste modelo de manómetro os iões descrevem uma trajetória muito longa em torno do coletor antes de serem capturados no coletor, como se pode observar na Figura 3.12. Este efeito poderá dar origem a efeitos de carga espacial que farão alterar as trajetórias das partículas carregadas no interior do medidor. Como a carga espacial não foi tida em conta na nossa simulação, ao contrário da simulação realizada pelo CERN, pode ser que esta seja a causa da diferença observada.

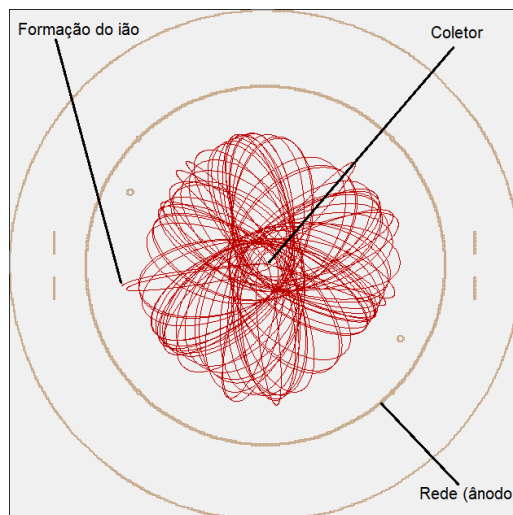


Figura 3.12: Trajetória de um único ião antes de ser coletado num manómetro Bayard-Alpert.

Outro aspeto, é que neste tipo de vacuómetro, os eletrões terminam a sua trajetória ao colidir com os pilares da rede (ânodo) depois de sucessivas passagens. A sensibilidade do manómetro é tanto maior quanto maior for a trajetória dos eletrões, o que sugere que a nossa simulação deveria dar uma trajetória média mais longa. Mas a definição da rede no SIMION é com base numa matriz discreta de pontos com uma densidade de 10 pontos/mm. Dado que os arames da rede têm um diâmetro de 0,13 mm, os elementos da rede que deveriam ter uma secção circular correspondem a uma geometria quadrada ou semelhante. A distâncias próximas da rede, o cálculo do campo elétrico está longe de corresponder ao campo produzido por uma secção circular, como está representado na Figura 3.13. Portanto, quando os eletrões se aproximam da rede para colidir, passam por uma zona em que a simulação é pouco exata, podendo resultar em trajetórias que estão longe de corresponder à realidade. Esta pode ser outra das causas da diferença observada entre a sensibilidade obtida pela nossa simulação e a obtida experimentalmente. É de observar que o *software* usado pelo CERN para a simulação, “Opera”, não usa uma matriz discreta de pontos para definir a geometria dos elétrodos sendo capaz de os definir vectorialmente.

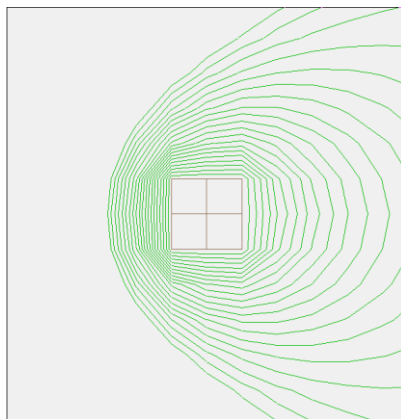


Figura 3.13: Linhas equipotenciais em torno de um dos aramedes da rede do manómetro Bayard-Alpert.

3.4 Simulação do manómetro linear 16NRM05

A definição da geometria para um novo manómetro no projeto europeu resultou da sua simulação de modo a se atingir os objetivos do projeto. O principal objetivo das simulações foi averiguar as variações na sensibilidade do manómetro ao alterar ligeiramente a sua geometria, na tentativa de recriar as deformações típicas que ocorrem na geometria dos manómetros de ionização em geral.

As dimensões de todos os elétrodos do manómetro assim como os seus potenciais foram fornecidas pelo grupo do CERN permitindo elaborar a modelação da sua geometria em CAD. A geometria do manómetro e os potenciais aplicados aos elétrodos podem ser observados na Figura 3.14.

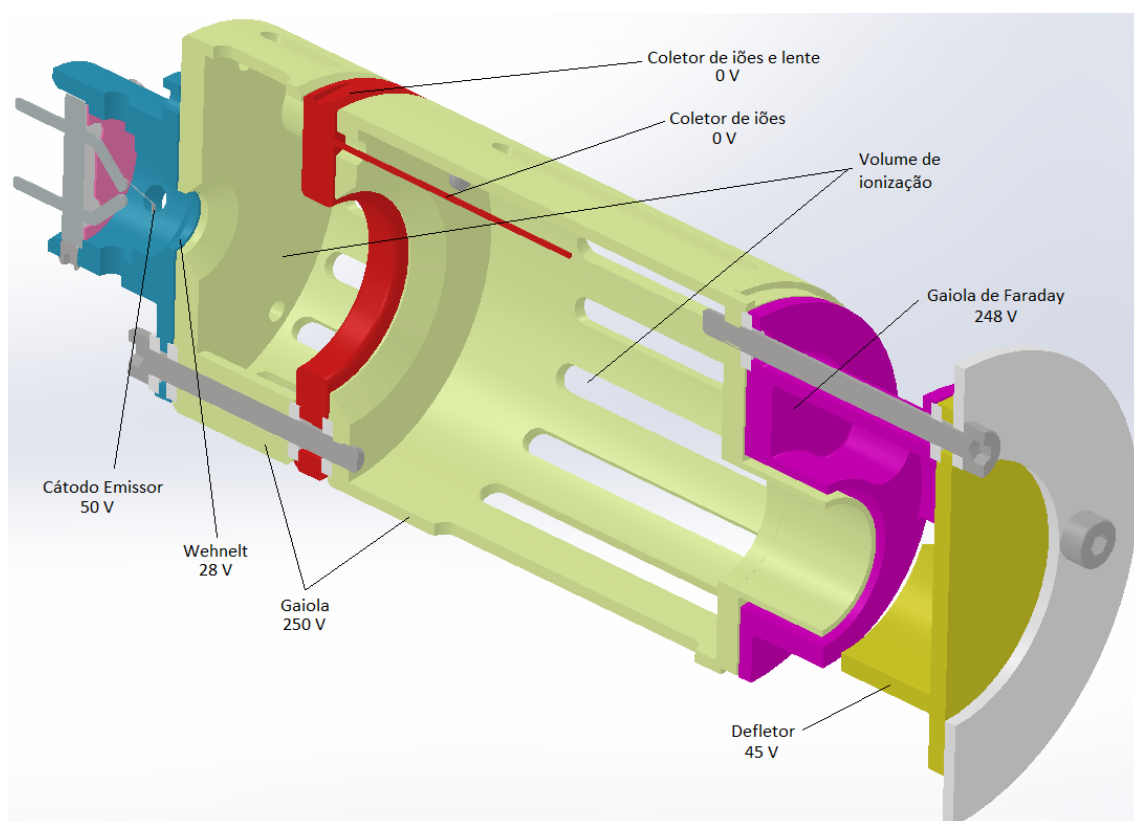


Figura 3.14: Representação 3D em corte do manómetro linear 16NRM05 e potenciais aplicados a cada elétrodo.

Neste manómetro, contrariamente ao “extrator” e ao Bayard-Alpert, os eletrões criados no cátodo produzem um único feixe de eletrões que o percorre uma vez o volume de ionização. Os eletrões são emitidos pelo cátodo e são acelerados para o volume de ionização, sendo a abertura do feixe controlada pelo elétrodo Wehnelt. Os eletrões, ao colidirem com o gás, provocam a ionização dentro do volume de ionização: os iões são capturados pelo coletor; os eletrões saem do volume para uma gaiola de Faraday pelo extremo oposto à entrada. O coletor de iões neste medidor também tem a função de lente, focando os eletrões na entrada da gaiola de Faraday,

sendo em seguida defletidos e coletados. Com esta geometria do manómetro pretende-se evitar as colisões de eletrões com os eléctrodos, minimizando a produção de partículas secundárias.

As simulações a realizar tinham como objetivo averiguar a alteração na sensibilidade do manómetro, obtida por cada uma das seguintes alterações:

- +/- 1 V no potencial do cátodo;
- desalinhamento do cátodo 0,2 mm segundo o eixo x, y e z;
- desalinhamento do wehnelt 0,1 mm segundo o eixo x, y e z;
- desalinhamento do anel coletor de iões 0,1 mm segundo o eixo x e y;
- torção da haste coletora de 4º no plano xOz e yOz.

Para análise das variações na sensibilidade foi usado o Modelo 2 de simulação. Na Figura 3.15 podem observar-se as trajetórias das partículas no interior do manómetro. Com a geometria e potenciais indicados (ver Figura 3.14), obteve-se uma sensibilidade de 30.26 mbar⁻¹ para N₂ a 300 K.



Figura 3.15: Ilustração das trajetórias das partículas no interior do manómetro linear 16NRM05; a preto encontram-se representadas as trajetórias dos eletrões e a vermelho dos iões.

Para as mesmas condições, calcularam-se as sensibilidades e o livre percurso médio dos eletrões efetuando as pequenas alterações propostas na geometria e potenciais aplicados. Os valores obtidos podem ser consultados na Tabela 3.4. Comparando os valores de sensibilidade verifica-se que existem algumas variações, no entanto, o livre percurso médio mantém-se aproximadamente constante. Este resultado leva à conclusão de que as variações na sensibilidade obtida podem-se dever à baixa estatística, ou seja, o número de trajetórias simuladas é demasiado baixo. Em alternativa, podem ocorrer pequenas variações na eficiência de coleção de iões do manómetro. Executando 10 vezes a mesma simulação verificou-se um desvio padrão de 0,232 mbar⁻¹. Desta forma, concluiu-se que as discrepâncias se devem maioritariamente à baixa estatística.

Tabela 3.4: Sensibilidade e livre percurso médio dos elétrons no manómetro 16NRM05 assumindo diferentes deformações da geometria e alterações nos seus potenciais.

Alterações na geometria ou potenciais	S (mbar ⁻¹)	L _i (mm)
Geometria e potenciais ideais	30.26	54.10
Varição de +1 V no potencial do filamento	29.74	54.11
Varição de -1 V no potencial do filamento	30.23	54.10
Desalinhamento do cátodo 0.2 mm em todos os eixos	30.35	54.09
Desalinhamento do Wehnelt 0.1 mm segundo o eixo x	29.33	54.14
Desalinhamento do Wehnelt 0.1 mm segundo o eixo z	31.05	54.09
Desalinhamento do anel coletor 0.1 mm segundo o eixo x e y	31.38	54.07
Torção da haste coletora 4º no plano yOz	30.36	54.04
Torção da haste coletora 4º no plano xOz	30.34	54.10

Através da aplicação do Modelo 2 de simulação verificou-se que a sensibilidade do manómetro era constante para pressões inferiores a 10⁻³ mbar tal como para os manómetros de ionização já existentes. Na Figura 3.16 encontra-se representada a sensibilidade em função da pressão para N₂ à temperatura ambiente, 300 K.

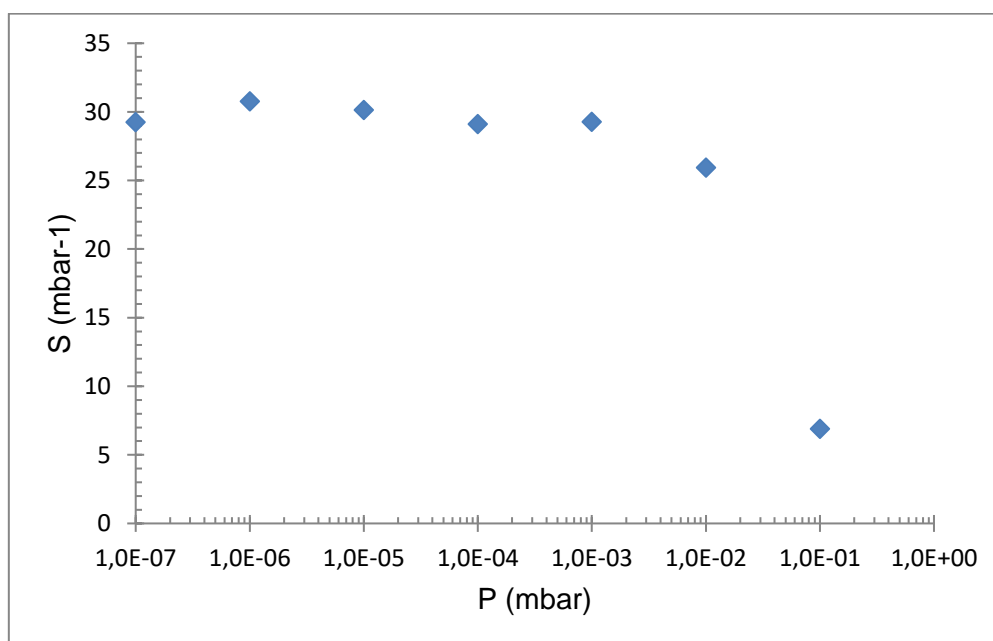


Figura 3.16: Sensibilidade em função da pressão obtida através do Modelo 2 simulando o manómetro linear 16NRM05 com N₂; T = 400 K.

Também foi estudada a eficiência do vacuómetro no isolamento do volume de ionização da emissão de elétrons secundários na gaiola de Faraday. Foram criados elétrons na superfície da gaiola de Faraday com energias bem definidas e direção e sentido aleatórios, conforme ilustrado na Figura 3.17. Verificou-se que o número de elétrons retrodispersos que entram no volume de ionização aumenta com a energia a que estes são emitidos de dentro da gaiola de Faraday. Na Tabela 3.5 encontram-se as razões dos elétrons que retornam para o volume de ionização em função dos emitidos da superfície da gaiola de Faraday. Para a energia máxima

de emissão de elétrons, 198 eV, que corresponde à energia dos elétrons que colidem com a gaiola, verificou-se que apenas cerca de 0,4% dos elétrons conseguem entrar no volume de ionização.

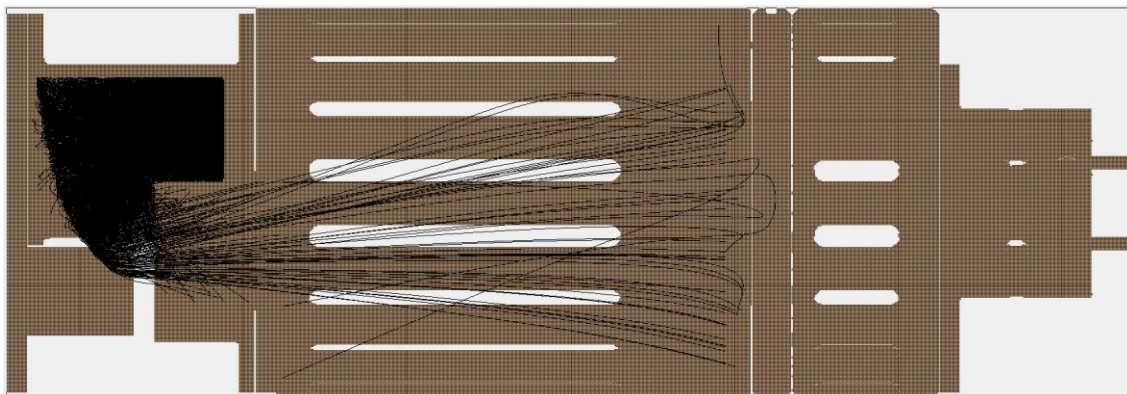


Figura 3.17: Trajetórias dos elétrons emitidos da superfície da gaiola de Faraday com energia de 150 eV.

Tabela 3.5: Razão de elétrons retrodispersos que escapam da gaiola de Faraday do manómetro 16NRM05 em função da sua energia inicial.

E (eV)	Elétrons emitidos	Elétrons que regressam ao volume de ionização	Razão
10	12800	0	0
50	12800	33	0,00257
100	12800	40	0,00312
150	12800	49	0,00382
198	12800	51	0,00398

Com estes resultados, concluiu-se que o manómetro adotado, em condições ideais de funcionamento, deverá ter uma sensibilidade de cerca de 30 mbar^{-1} para pressões inferiores a 10^{-3} mbar . Verificou-se ainda que deformações na sua geometria ou alterações nos potenciais aplicados aos elétrodos criam variações na sensibilidade inferiores ao desvio padrão, demonstrando assim ser um manómetro robusto. Segundo as simulações realizadas, a reemissão de elétrons da gaiola de Faraday para o volume de ionização é inferior a 0,4%.

3.5 Simulações de um novo manómetro cilíndrico

3.5.1 Simulação e aperfeiçoamento da ideia inicial

O desenvolvimento deste novo manómetro de ionização foi pensado como alternativa ao adotado pelo consórcio do projeto europeu e considerando a eliminação das fontes de

instabilidade dos manômetros atuais. Para além de ser robusto, este manómetro deve controlar a existência de emissões secundárias que alterem a medição da pressão, permitindo não só aumentar a estabilidade como reduzir o limite de pressão medida pelo manómetro.

A geometria idealizada inicialmente tem como ideia base ocultar o coletor de qualquer fonte de emissões secundárias. A simulação da primeira geometria do manómetro pode ser observada na Figura 3.18. Para evitar a coleção de partículas provenientes de emissões secundárias no coletor de iões, este fica oculto do filamento e do coletor de eletrões, não recebendo os raios X produzidos pela colisão dos eletrões com o seu coletor. Os eletrões neste manómetro, ao serem emitidos pelo filamento, vão ser acelerados através de um campo elétrico radial descrevendo uma trajetória circular, semelhante ao que acontece num analisador de energia. Até iniciarem a sua trajetória circular em torno do cilindro, os eletrões adquirem uma energia superior a 100 eV permitindo que estes ionizem os gases no interior do manómetro. Quando se dá a ionização, os iões vão ser repelidos pelo cilindro contra o envelope ou coletor de iões. Apenas será contabilizada a corrente de iões que atinge o coletor.

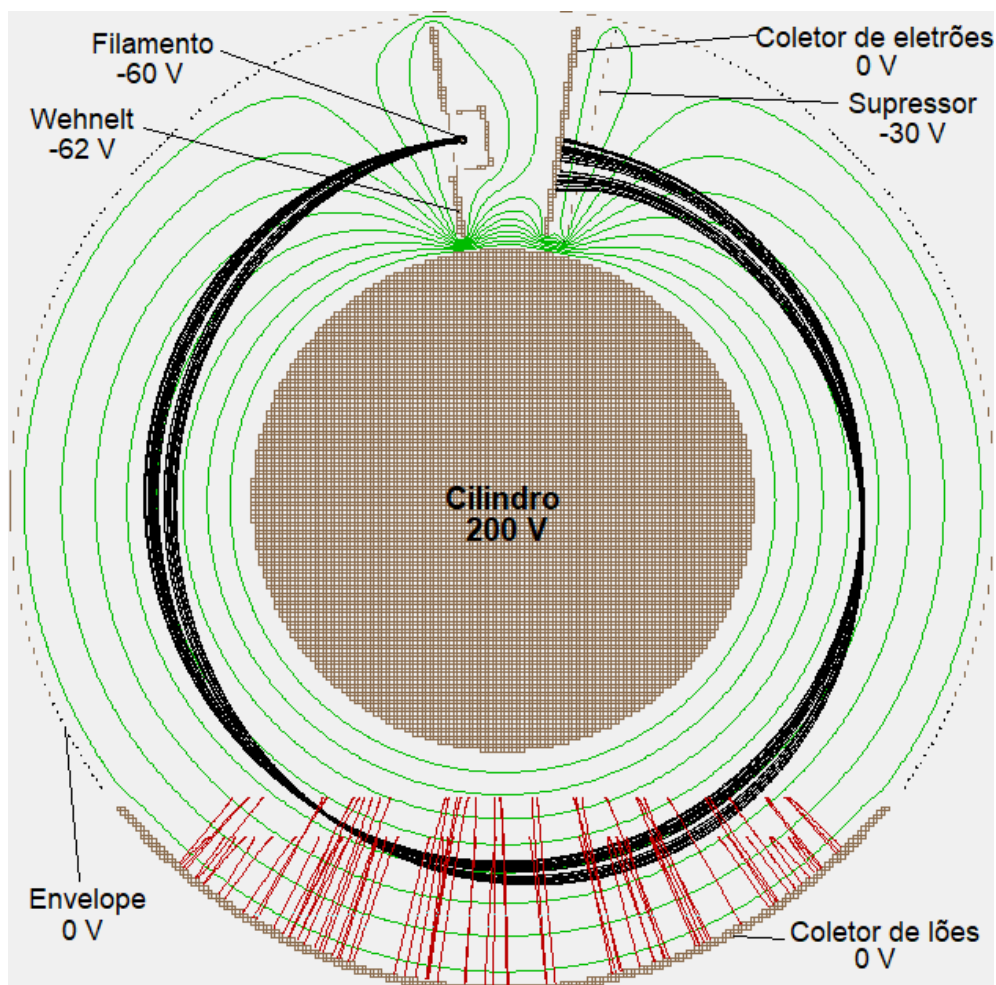


Figura 3.18: Trajetórias dos eletrões emitidos da superfície da gaiola de Faraday com energia de 150 eV.

Na tentativa de ocultar ainda mais o coletor de íons do coletor de elétrons (que é uma fonte de raio X), foram feitas algumas alterações da geometria na zona de coleção de elétrons. As várias etapas do progresso da concepção do recetor de elétrons estão representadas na Figura 3.19. No modelo final, o coletor de elétrons encontra-se no interior do cilindro, formando uma gaiola de Faraday. Para que os elétrons sejam introduzidos na gaiola de Faraday é utilizado um elétrodo curvo que os deflete para o interior e uma rede retardadora para reduzir a sua energia.

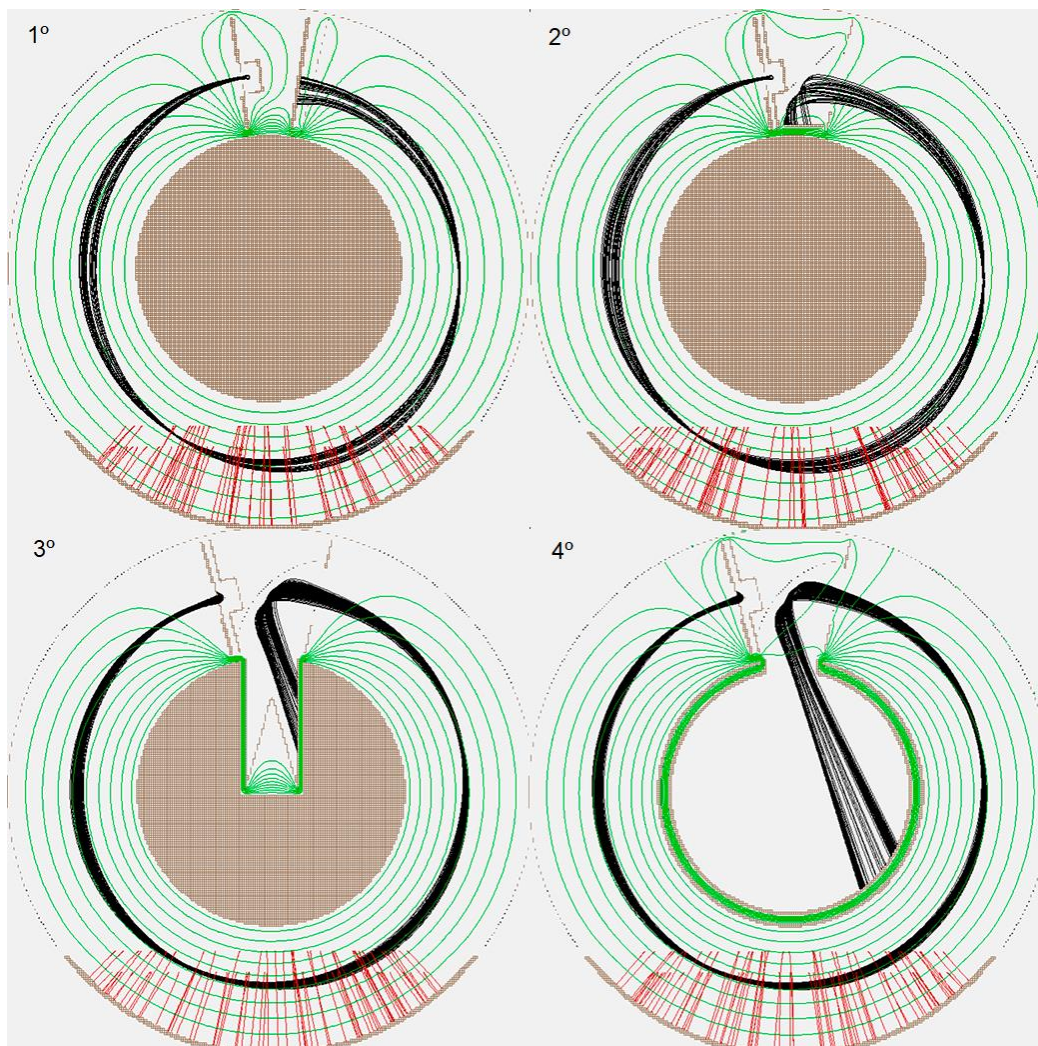


Figura 3.19: Etapas no processo de idealização da coleção de elétrons; representações em SIMION.

Outras melhorias foram feitas ao projeto do manómetro ao longo do tempo. Para evitar a emissão secundária de elétrons após a colisão dos íons no coletor e no envelope, foi aplicada uma rede supressora no interior do envelope e coletor em todo o seu perímetro de interesse. Aplicando um potencial de -10 V à rede, os elétrons criados por emissão secundária são quase todos suprimidos, não entrando para o volume de ionização. Sendo uma rede, os íons produzidos no volume de ionização são acelerados na sua direção atravessando-a e colidindo com o coletor e com o envelope. Outra melhoria foi a eliminação da rede retardadora junto ao elétrodo defletor dos elétrons. Para tal, o ângulo do defletor foi ajustado assim como o seu potencial. O potencial

do elétrodo defletor deve ser idêntico ao do filamento para que os eletrões não o consigam alcançar e sejam defletidos para o interior da gaiola. A geometria final, depois das melhorias descritas está ilustrada na Figura 3.20, assim como as trajetórias das partículas no interior do medidor.

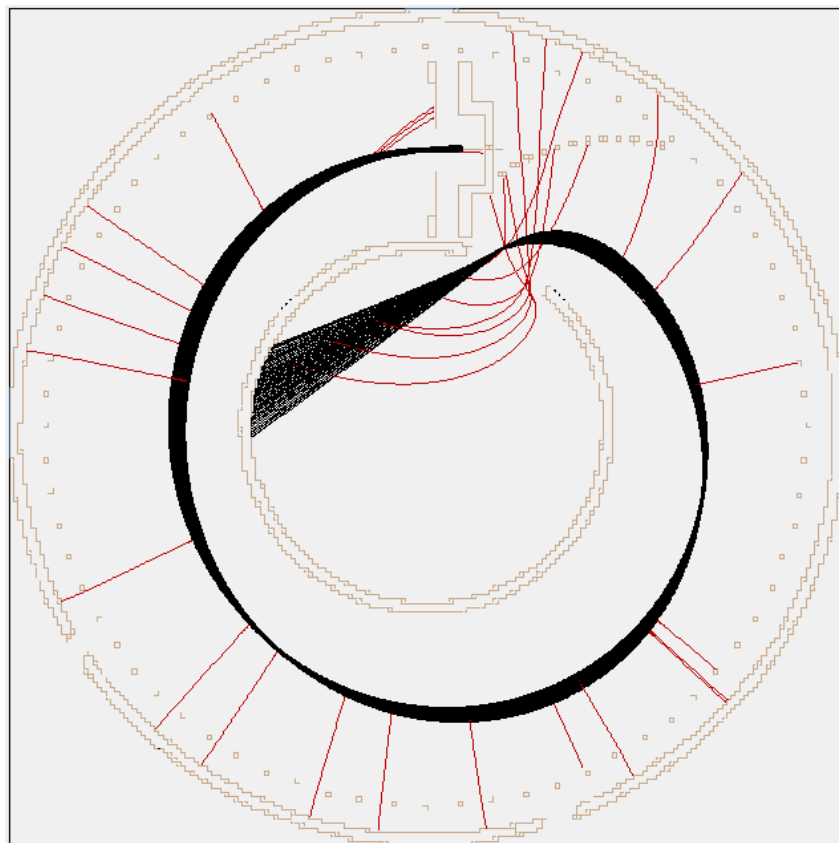


Figura 3.20: Simulação em SIMION do funcionamento do manómetro cilíndrico depois de definidos os eletrodos a utilizar; a preto encontram-se representadas as trajetórias dos eletrões e a vermelho dos iões.

Após este desenvolvimento, foi necessário estudar a estabilidade do vacuómetro, verificando quais as implicações na sensibilidade produzidas por alterações da sua geometria ou potenciais. Para esse fim, foram criadas várias alterações ao manómetro:

- Translação do filamento +0.1 mm afastado do centro do manómetro;
- Translação do filamento +0.2 mm afastado do centro do manómetro;
- Translação do filamento -0.2 mm afastado do centro do manómetro;
- Alteração do potencial do cilindro em +5 V;
- Simulação da variação de potencial de 2 V no filamento.

Os resultados da sensibilidade foram obtidos através do Modelo 2 e encontram-se indicados na Tabela 3.6. Observando a tabela verifica-se que a sensibilidade se mantém estável

apesar das alterações consideradas. Verifica-se também que a variação na sensibilidade é inferior ao desvio padrão associado às simulações.

Tabela 3.6: Sensibilidade do manómetro cilíndrico assumindo diferentes deformações da geometria e alterações nos seus potenciais.

Alterações na geometria ou potenciais	$S \pm \sigma$ (mbar ⁻¹)
Geometria e potenciais ideais	8,72 ± 0,75
Translação do filamento +0.1 mm	9,07 ± 0,80
Translação do filamento +0.2 mm	8,87 ± 0,78
Translação do filamento -0.2 mm	8,57 ± 0,59
Alteração do potencial do cilindro em +5 V	8,80 ± 0,39
Variação de potencial de 2 V no filamento	8,89 ± 0,37

3.5.2 Simulação da estabilidade do manómetro

Para que o manómetro pudesse ser construído foi necessário fazer uma reformulação da proporção de todos os eléctrodos, ajustando as dimensões por forma a torná-lo concretizável. Todos os ajustes necessários serão descritos no capítulo seguinte.

A versão final deste medidor, com as dimensões de produção dos eléctrodos, foi simulada usando o Modelo 2 para determinação da sua sensibilidade para diversos gases. Na Figura 3.21 está representada esta geometria assim como as trajetórias das partículas no seu interior. Na Figura 3.22 encontram-se ilustradas as superfícies de energia potencial para eletrões do manómetro e as trajetórias das partículas nessas mesmas superfícies.

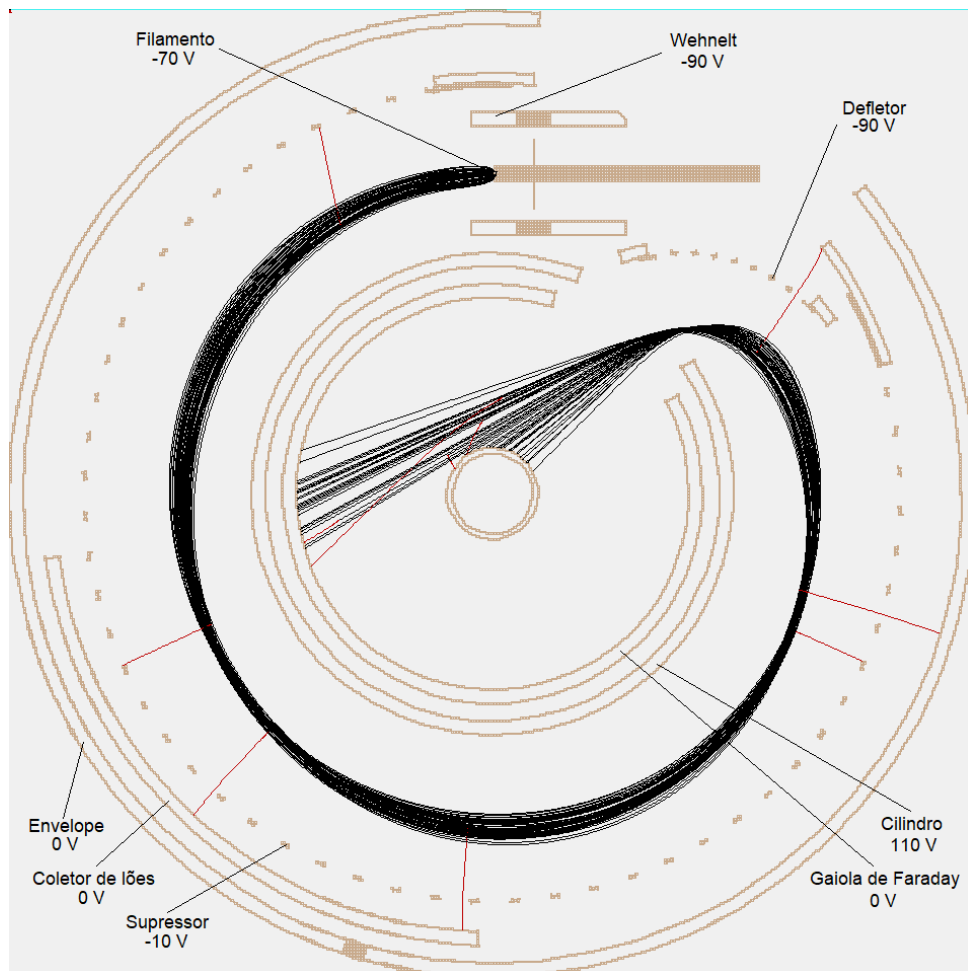


Figura 3.21: Representação final da geometria dos eletrodos, potenciais aplicados e trajetórias; a preto encontram-se representadas as trajetórias dos elétrons e a vermelhos dos íons.

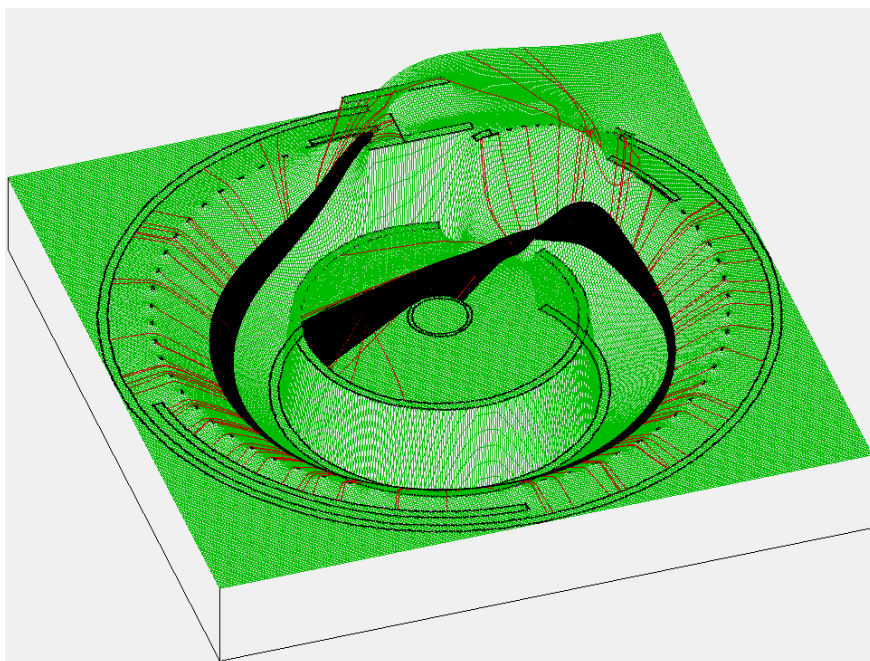


Figura 3.22: Superfícies de energia potencial para elétrons no interior do manômetro cilíndrico; a preto encontram-se representadas as trajetórias dos elétrons e a vermelhos dos íons.

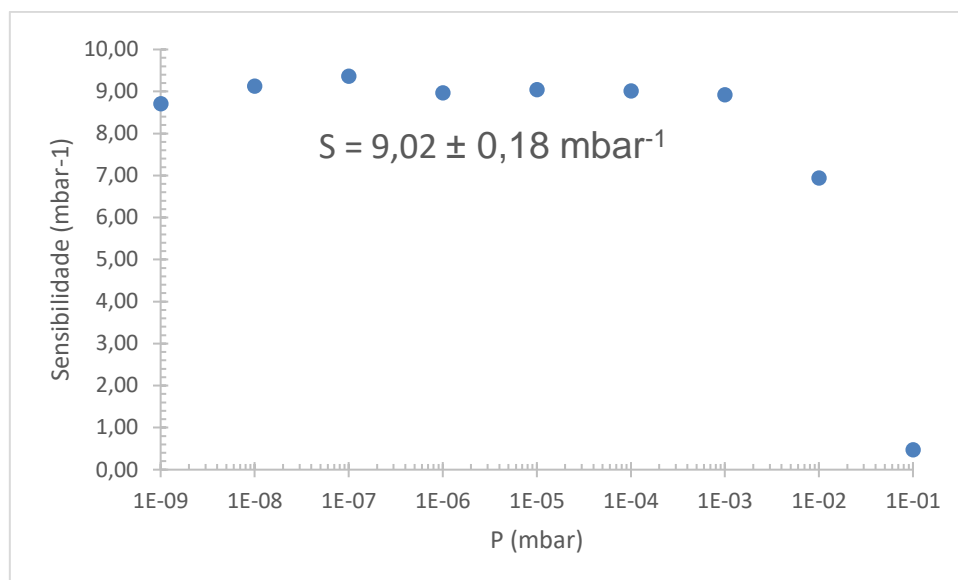


Figura 3.23: Sensibilidade do manómetro cilíndrico em função da pressão para N₂; T = 300 K; $S = 9,02 \pm 0,18 \text{ mbar}^{-1}$ para gama de pressão de trabalho do manómetro.

A sensibilidade do manómetro foi inicialmente calculada para a temperatura ambiente em função da pressão e obteve-se o resultado descrito na Figura 3.23. Para o intervalo de pressão de trabalho do manómetro, inferior a 10^{-3} mbar , a sensibilidade do manómetro é cerca de 9 mbar^{-1} . Para pressões superiores a 10^{-3} mbar , a sensibilidade do manómetro decresce, como era expectável dado que o livre percurso médio dos eletrões para essas pressões é inferior à distância percorrida no interior do medidor.

Posteriormente, foi calculada a sensibilidade para diversos gases a diferentes temperaturas; os resultados estão apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Sensibilidade calculada para o manómetro cilíndrico através do Modelo 2 de simulação para diferentes gases e temperaturas.

T(K)	N ₂	He	H ₂	Ar
300	$9,02 \pm 0,18$	$1,22 \pm 0,06$	$3,15 \pm 0,16$	$9,32 \pm 0,78$
400	$6,71 \pm 0,20$	$0,90 \pm 0,04$	$2,34 \pm 0,09$	$6,91 \pm 0,39$

Comparando estes resultados com os indicados na Tabela 3.2, verifica-se que a sensibilidade esperada é semelhante à sensibilidade do manómetro “extrator”. Com esta sensibilidade, a uma pressão de 10^{-9} mbar , é expectável medir correntes de iões na ordem de pico amperes. Medir correntes com esta ordem de grandeza é facilmente atingível com os eletrómetros atuais.

Também foi calculado o livre percurso médio dos eletrões na sua trajetória, obtendo-se um livre percurso médio de 138,8 mm. Verificou-se também que eficiência de coleção de iões é cerca de 17%. Uma eficiência de coleção tão baixa era expectável dado que existe produção de iões ao longo de todo o feixe de eletrões, mas apenas é contabilizada a corrente de iões criada em frente ao coletor.

3.5.3 Simulação do conjunto de emissão

O conjunto de emissão de eletrões, onde está incorporado o cátodo, foi considerado de forma a produzir o feixe necessário para o correto funcionamento do manómetro. O conjunto de emissão deve permitir a produção de um feixe pouco divergente em que as trajetórias dos eletrões que o constituem sejam quase paralelas. O conjunto de emissão deve ainda proporcionar a emissão de uma corrente de eletrões igual ou superior a 0,1 mA, para que a corrente de iões coletada não seja demasiado baixa quando forem medidas baixas pressões.

Inicialmente, estudou-se a possibilidade de o cátodo ficar no interior de uma caixa, cuja abertura era uma fenda de 2 mm, formando assim um Wehnelt para focagem do feixe. O Wehnelt ficaria a um potencial repulsivo para os eletrões e o cilindro no exterior da caixa encontra-se a um potencial atrativo. Verificou-se que variando a diferença de potencial entre o filamento e o Wehnelt obtém-se mais ou menos focagem do feixe, no entanto, verificou-se também que se reduz drasticamente a corrente extraída do cátodo devido ao aumento do potencial repulsivo imposto pelo Wehnelt. Ajustando todos os potenciais por forma a obter um feixe focado verificou-se que o potencial do Wehnelt deveria ser 3 V mais negativo que o potencial aplicado ao cátodo e que o campo elétrico junto à frente do cátodo era cerca de 1 V/mm. Na Figura 3.24 encontram-se duas representações do conjunto de emissão referido.

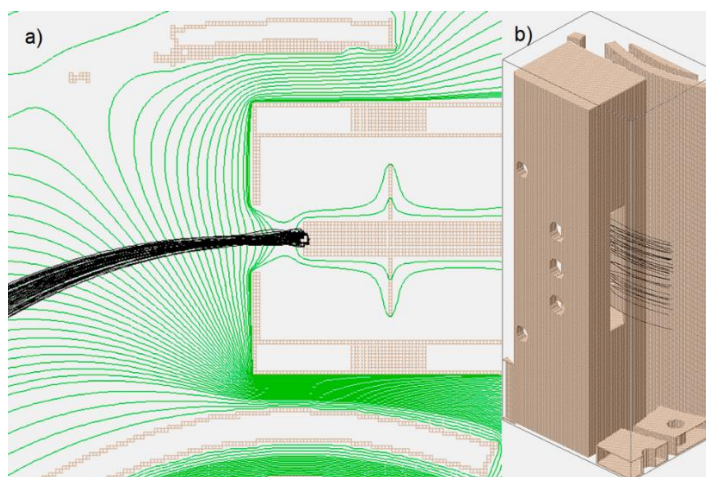


Figura 3.24: Representações das trajetórias dos eletrões à saída do cátodo no conjunto emissor inicial: a) vista de topo em corte do cátodo e da caixa que fixação; b) vista tridimensional do conjunto emissor e trajetórias dos eletrões à sua saída.

As simulações realizadas, em conjunto com o estudo experimental descrito posteriormente neste documento, revelaram que o campo elétrico medido na frente do cátodo era insuficiente. Em resultado disso, não era possível extrair uma corrente aceitável de elétrons. Diversas geometrias e potenciais para o conjunto de emissão foram testados chegando a outra configuração. Em alternativa à fenda na parede da caixa que continha o cátodo, foi removida a face da caixa que continha a fenda e foi redimensionada a caixa. Com o ajuste adequado dos potenciais, tornando a caixa ainda mais repulsora para os elétrons, conseguiu obter-se uma boa focagem do feixe e aumentar o campo elétrico de extração dos elétrons. Verificou-se que, para se conseguir uma boa focagem do feixe, o potencial da caixa que contem o filamento deveria ser cerca de 20 V mais negativo que o potencial do filamento. Com a nova geometria, o campo elétrico junto ao filamento passou a ser cerca de 10 V/mm, aumentando 10 vezes em comparação com a configuração anterior. Isto faria esperar a produção de um feixe mais intenso. A ilustração do novo conjunto de emissão encontra-se na Figura 3.25.

De acordo com a Lei de Child, a densidade de corrente emitida de um eletrodo para outro, considerando um campo elétrico uniforme, é dada por

$$j = \frac{4}{9} \varepsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{V^{\frac{3}{2}}}{d^2} \quad (3.2)$$

onde ε_0 representa a constante de permissividade do vácuo, m a massa do eletrão, e a carga elementar, d a distância entre os dois eletrodos e V a diferença de potencial entre eles. Utilizando a aproximação de que o campo elétrico junto ao filamento é uniforme e sabendo que o campo elétrico é proporcional à diferença de potencial, então, o aumento de 10 vezes do campo elétrico implica um aumento de $10^{3/2}$ na densidade de corrente emitida pelo cátodo.

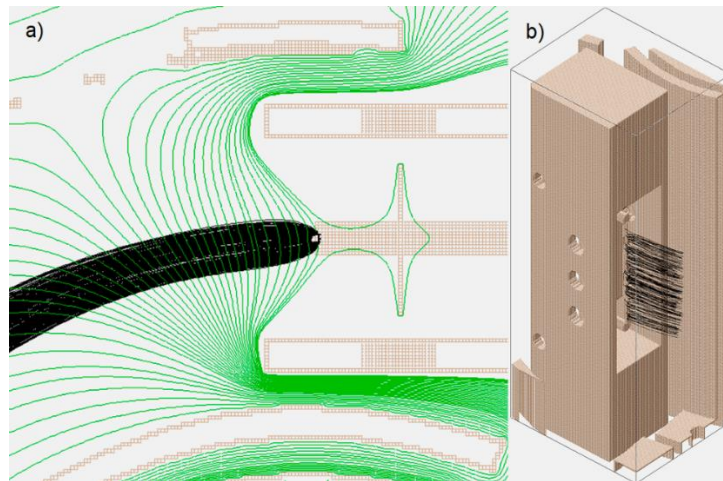


Figura 3.25: Representações das trajetórias dos elétrons à saída do cátodo no conjunto emissor final: a) vista de topo em corte do cátodo e da caixa que fixação; b) vista tridimensional do conjunto emissor e trajetórias dos elétrons à sua saída.

As simulações efetuadas do conjunto de emissão para o vacuómetro permitiram refinar a geometria e os potenciais para o conjunto de emissão, permitindo um feixe de melhor qualidade, adequado para o bom funcionamento do manómetro. Verificou-se também que pequenas variações no potencial e na geometria do Wehnelt resultam em grandes variações no campo elétrico junto ao cátodo.

3.6 Conclusões retiradas das simulações

Neste trabalho foram simulados quatro manómetros de ionização em que dois são medidores existentes e bastante usados, manómetro Bayard-Alpert e “extrator”. Os outros dois são medidores em desenvolvimento, o manómetro linear 16NRM05 e o manómetro cilíndrico.

As simulações dos manómetros “extrator” e Bayard-Alpert não só permitiram obter conhecimento do seu funcionamento como conferir a fiabilidade dos modelos de simulação aplicados neste trabalho. Com estas simulações obtiveram-se resultados que se encontram em concordância com os valores medidos experimentalmente. Através das simulações verificou-se também que a retrodispersão de eletrões no ânodo desses mesmos manómetros influencia em mais de 10% a sensibilidade do manómetro, indo ao encontro das estimativas descritas na literatura.

No decorrer do projeto de desenvolvimento do manómetro linear 16NRM05, as simulações descritas neste trabalho auxiliaram o estudo inicial do instrumento estimando a sensibilidade do manómetro e as suas alterações provocadas por eventuais deformações da geometria. Verificou-se uma sensibilidade de cerca de 30 mbar^{-1} à temperatura ambiente, com as deformações previstas a não alterarem significativamente a sua sensibilidade.

No estudo do manómetro cilíndrico as simulações elaboradas tiveram um papel preponderante nas decisões tomadas sobre o desenvolvimento do manómetro. Todas as alterações feitas à geometria dos elétrodos foram feitas em conformidade com os resultados das simulações permitindo conhecer melhor o funcionamento do manómetro. A sensibilidade prevista para este manómetro é cerca de 9 mbar^{-1} . Verificou-se também a robustez e viabilidade do manómetro em simulação, permitindo assim o avanço para a construção.

Em todas as simulações, a temperatura foi sempre uma variável desconhecida, sendo que representa a maior fonte de incerteza para os valores de sensibilidade obtidos. Estes foram calculados para diversas temperaturas, no entanto a temperatura a que os manómetros se encontram permanece razoavelmente desconhecida, não permitindo uma simulação tão realista no cálculo da sensibilidade dos manómetros.

É de realçar que os modelos de simulação não incluem a totalidade dos fenómenos físicos descritos na literatura presentes nos manómetros de ionização. A influência de muitos fenómenos de emissão secundária na sensibilidade não foi considerada nas simulações. No

entanto, apesar de a contribuição destes fenómenos não ser contabilizada de forma quantitativa, a idealização do manómetro cilíndrico teve em conta a minimização desses fenómenos.

Projeto e montagem do manómetro cilíndrico

Neste capítulo são descritos os pormenores práticos do desenvolvimento do manómetro cilíndrico anteriormente estudado. Descrevem-se as ligações aos eléktodos e a fixação do manómetro à câmara de vácuo. São também abordadas as formas de ligação elétrica com o medidor e é explicado o funcionamento do controlador eletrónico construído. Por fim, apresenta-se o estudo da emissão de cátodos, tendo em consideração a sua aplicação no medidor.

4.1 Projeto dos eléktodos

4.1.1 Montagem e ligações

O manómetro cilíndrico foi idealizado de forma a que o seu diâmetro máximo fosse de 62 mm, para ser fixado num flange de 2½". Todas as dimensões foram projetadas tendo em conta este diâmetro máximo. Dado que a maioria dos eléktodos tinham a forma de tubo cilíndrico, foram projetados com uma espessura de 1 mm, para que fossem robustos e pouco sujeitos a deformações. O eléktodo mais externo é designado envelope e tem a função de suporte para todos os outros eléktodos que se encontram no seu interior. Por esse motivo, o envelope foi criado em forma de taça, possuindo um fundo ao qual todos os eléktodos são fixados através de parafusos. Foi produzido também uma tampa para o manómetro que encaixa diretamente no envelope e fica segura através de um parafuso que atravessa o manómetro pelo centro. Para garantir uma equalização da pressão foram produzidos orifícios na tampa. Na Figura 4.1, podem ser observados os eléktodos no interior do manómetro apoiados no eléktodo externo, o envelope.

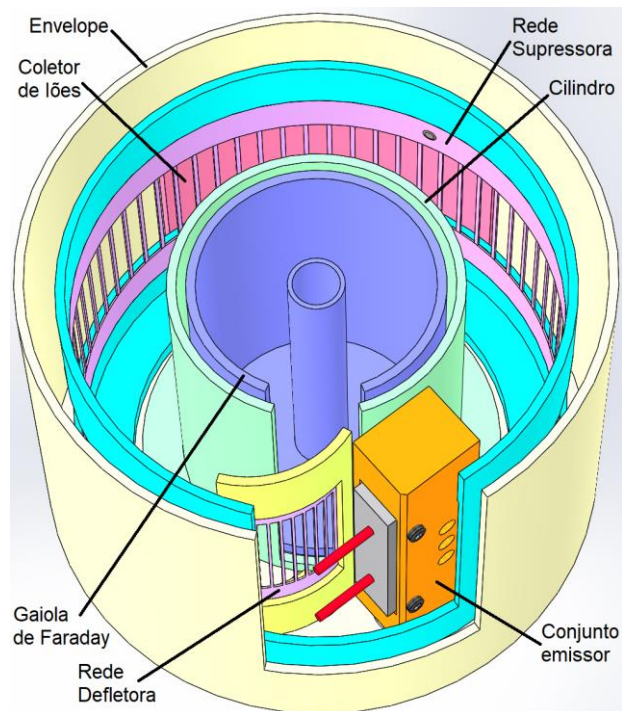


Figura 4.1: Representação tridimensional do manômetro cilíndrico (sem a tampa).

Visto que cada elétrodo possui um potencial distinto, deverá existir um bom isolamento elétrico entre eles. Usaram-se buchas cerâmicas e parafusos para apertar os elétrodos e o envelope sem que estes entrassem em contacto elétrico. Na Figura 4.2 está ilustrado como foi efetuada a montagem mecânica com o isolamento elétrico.

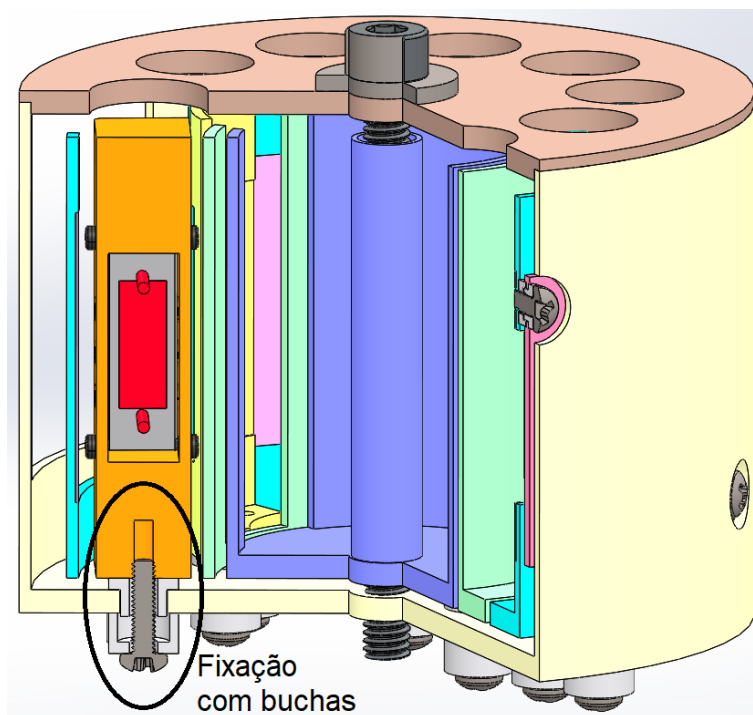


Figura 4.2: Representação tridimensional em corte do manômetro cilíndrico com o pormenor evidenciando a montagem com isolamento elétrico.

Dado que dois dos elétrodos possuem uma rede, o supressor e o defletor, foi necessário criar um suporte em forma de aro para que a rede permanecesse imóvel fixando-a ao envelope como todos os outros elétrodos. Como tal, a espessura definida para ambas as redes foi de 0,2 mm, e foram fixadas aos aros encaixando num rebaixo de 0,25 mm. Os rebaixos foram criados com as dimensões das redes por forma a que estas ficassem estáveis e pudessem ser posteriormente soldadas por pontos, como ilustrado na Figura 4.3.

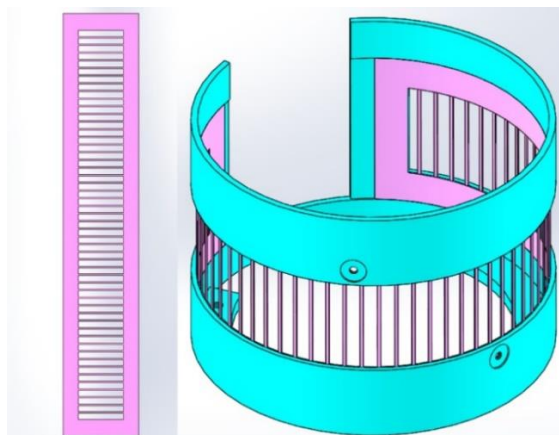


Figura 4.3: Representações da rede supressora tal como é produzida e da mesma aplicada no aro de suporte; a rosa encontra-se a rede supressora e a verde o aro de suporte.

O conjunto de emissão foi projetado de forma a ser facilmente removido e alterado fora do manómetro, permitindo ajustes na emissão de forma simples. Este é fixado ao envelope através de dois parafusos com buchas cerâmicas, tal como os outros elétrodos. O conjunto de emissão é constituído por um filamento, que tem a função de cátodo emissor e que está fixo a uma placa cerâmica, que por sua vez encaixa num elétrodo que a envolve. O elétrodo não só serve de estrutura ao conjunto de emissão como também de elétrodo de focagem. A representação do conjunto de emissão encontra-se na Figura 4.4.

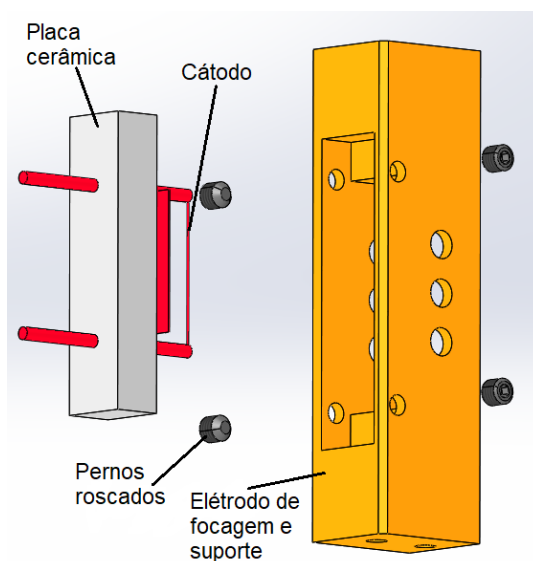


Figura 4.4: Vista explodida do conjunto de emissão do manómetro cilíndrico.

Todos os desenhos técnicos individuais e de conjunto dos eléctrodos do manómetro cilíndrico podem ser consultados no Anexo 1 deste documento.

A ligação do manómetro à câmara de vácuo é realizada através de um flange com passadores eléctricos especiais para garantir o adequado contacto eléctrico com o exterior da câmara. O medidor foi montado no flange através de um veio que une o parafuso central do manómetro e o flange permitindo assim uma fixação robusta. Os contactos eléctricos entre os eléctrodos e os passadores eléctricos foram feitos através de fios condutores isolados com kapton que ligam os parafusos de fixação dos eléctrodos aos pinos do passador eléctrico. As ligações eléctricas entre o passador eléctrico e os eléctrodos podem ser observadas na Figura 4.5.



Figura 4.5: Manómetro cilíndrico fixo ao flange e das ligações para contacto eléctrico.

4.1.2 Material e produção dos eléctrodos

Os eléctrodos foram produzidos em aço inoxidável, sendo esta uma solução viável e económica. Os parafusos que apertam os eléctrodos do manómetro são também de aço inoxidável.

Os elementos de isolamento entre eléctrodos são de alumina por forma a garantir um bom isolamento e deixando a montagem e desmontagem dos eléctrodos bastante prática.

Os eléctrodos cilíndricos e a caixa do conjunto de emissão, incluindo os eléctrodos que suportam as redes, foram maquinados num torno e fresadora convencionais. As redes supressora e defletora foram produzidas através de corte a laser de precisão dadas as suas

dimensões extremamente reduzidas. Os outros componentes normalizados, como parafusos para as ligações e elementos de isolamento em cerâmica, foram adquiridos no mercado. Na Figura 4.6 encontra-se representado o manómetro cilíndrico montado sem o conjunto de emissão.



Figura 4.6: Manómetro cilíndrico produzido e montado sem o conjunto de emissão.

No sentido de evitar as emissões secundárias no interior do manómetro, decidiu-se criar um revestimento da superfície dos eléctrodos com um material com baixa emissão secundária de partículas e por outro lado bom condutor de corrente eléctrica. Assim sendo, revestiram-se os eléctrodos com grafite através da sua pulverização com *spray* obtendo-se um revestimento uniforme dos eléctrodos. As imagens dos eléctrodos revestidos com grafite encontram-se na Figura 4.7.



Figura 4.7: Manómetro cilíndrico montado após revestimento dos eléctrodos com grafite.

4.2 Controlador eletrónico

Para que fosse possível o teste do manómetro cilíndrico foi necessário construir um controlador eletrónico para a aplicação dos potenciais aplicados e para a medição das correntes produzidas e coletadas nos elétrodos. Para os primeiros testes, optou-se pelo desenvolvimento de um controlador analógico para aplicação de potenciais e medição da corrente de eletrões. Para a medição da corrente de iões que, dada a sua ordem de grandeza, optou-se por utilizar um eletrómetro externo.

Este controlador permite a aplicação de potenciais variáveis de 0 a 200 V aos elétrodos com regulação através de potenciômetros de 10 voltas e a sua medida através de um voltímetro com mostrador digital. Para além destes, o mostrador digital permite ainda a medição da corrente aplicada ao cátodo e da corrente de eletrões emitida pelo cátodo. A Figura 4.8 apresenta uma fotografia do painel frontal do controlador eletrónico desenvolvido.

Para a geração dos potenciais variáveis foram usados 4 módulos EMCO CA02, 3 negativos de 0 a -200 V e 1 positivo de 0 a 200 V, regulados por uma tensão DC de 0 a 5 V. Os três módulos de tensão negativa foram utilizados para gerar os potenciais da rede supressora, do cátodo e o terceiro para o Wehnelt e rede defletora (que segundo as simulações ficariam ao mesmo potencial). O módulo de tensão positiva foi utilizado para criar o potencial do cilindro. Para a alimentação destes módulos foi adquirida uma fonte de tensão de 12 V DC. A ficha técnica dos módulos EMCO CA02 encontra-se no Anexo 2.



Figura 4.8: Painel frontal do controlador eletrónico do manómetro cilíndrico.

Dada a necessidade de controlar a corrente de elétrons emitida pelo cátodo, é necessário o controlo da corrente no filamento. Para tal, foi utilizado uma fonte flutuante de corrente para o filamento, com uma corrente de saída de 0 a 5 A, controlada através de tensão de 0 a 5 V DC. Para alimentação da fonte de corrente foi utilizado um transformador de 230/6,3 V AC de 36 W.

A medição das correntes em cada elétrodo pode ser feito através de resistências de 10k Ω entre os módulos DC e os elétrodos. A diferença de potencial medida nas resistências resulta da corrente de partículas recebida pelos elétrodos.

O mostrador digital usado foi um voltímetro digital LED fabricado por “Murata Power Solutions”, DMS-40PC-1, com tensão de entrada de 0 a 2 V. Para a obtenção das leituras das tensões aplicadas aos elétrodos foi necessário aplicar divisores de tensão, de forma a adequar as tensões dos módulos para a tensão de entrada no voltímetro. Para alimentar o voltímetro foi usada uma fonte de tensão de 5 V DC.

Para a medição da corrente de iões recebida no coletor do manómetro foi utilizado um pico amperímetro digital externo fabricado por “RBD Instruments, Inc.”, RBD 9103, que permite a leitura direta da corrente de iões num computador através de ligação USB. A corrente de iões é extraída do manómetro cilíndrico através do flange com uma conexão BNC diretamente para o eletrómetro. A corrente de elétrons recebida na gaiola de Faraday é medida por um amperímetro através de um conector BNC, dado que a corrente de elétrons é várias ordens de grandeza superior à corrente de iões coletada.

No Anexo 3 encontra-se um esquema com informação mais detalhada das ligações do controlador eletrónico desenvolvido.

4.3 Produção e ensaio de cátodos

No decorrer do desenvolvimento do manómetro cilíndrico foi necessário o estudo de cátodos a serem usados. Este deveria permitir a emissão de uma corrente de elétrons suficientemente elevada e deveria permanecer sem deformações com o decorrer da sua utilização de forma a evitar variações na corrente de elétrons emitida.

Foram testados 3 cátodos, de materiais e geometria distinta. Os filamentos foram produzidos no laboratório Metrovac e testados em alto vácuo. Estes foram montados em conjunto com um segundo elétrodo, um ânodo, formando um díodo.

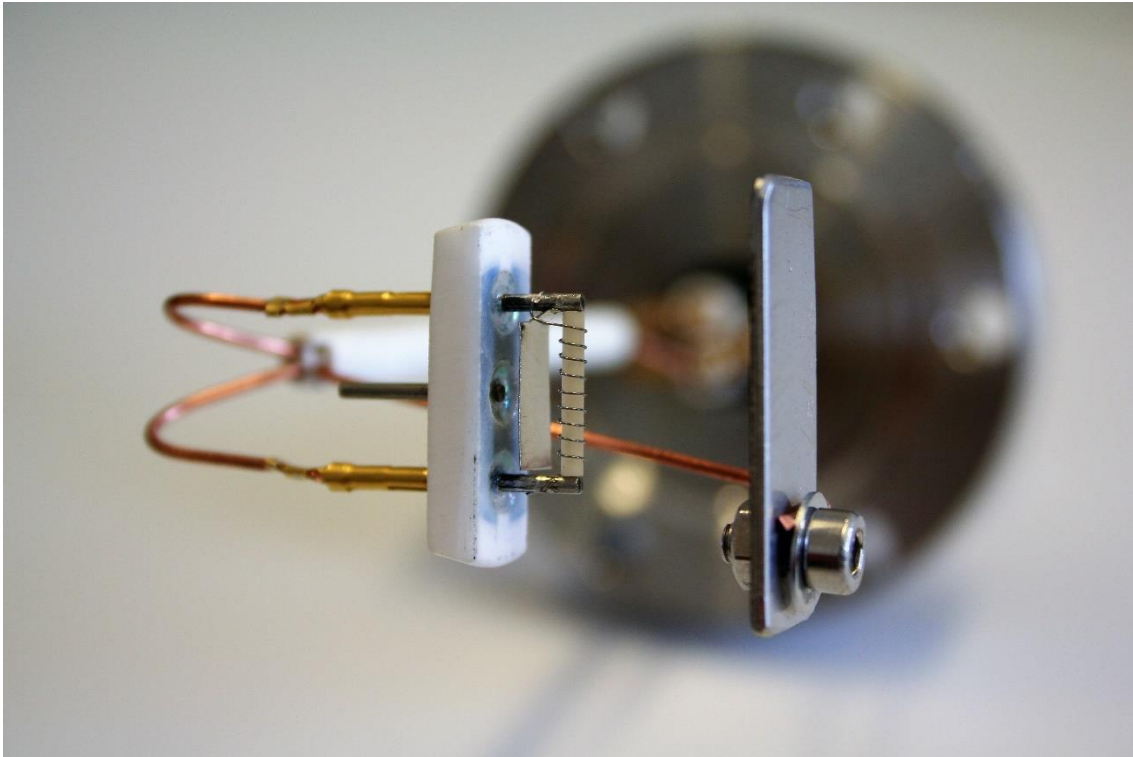


Figura 4.9: Díodo com filamento helicoidal em Rénio.

Para prevenir deformações no filamento, e alterar a corrente de elétrons emitida, considerou-se a utilização de um enrolamento helicoidal em torno de uma haste cerâmica, conforme se ilustra na Figura 4.9. Desta forma, as deformações que pudessem ocorrer ao longo do tempo não provocariam uma curvatura do filamento. Para o primeiro filamento foi usado fio de rénio com uma espessura de 0,15 mm. O segundo filamento produzido possuía a mesma geometria, no entanto foi produzido com fio de tungsténio toriado com 0,15 mm de espessura.

A utilização de rénio tem a vantagem de aumentar a durabilidade do filamento dado que é um metal mais inerte que o tungsténio toriado. Contudo, é expectável a emissão de uma corrente de elétrons mais baixa ao usar rénio, pois a sua função de trabalho é superior à do tungsténio toriado. Considerando a lei de Richardson, a densidade e corrente emitida pelo cátodo, j , em função da sua temperatura é dada por:

$$j = A T^2 e^{\frac{-W}{k_B T}} \quad (4.1)$$

onde T representa a temperatura a que se encontra o filamento, k_B a constante de Boltzmann, W a função de trabalho do material e A é a constante de Richardson e tem valor de $1,20173 \times 10^{-6} \text{ A m}^{-2} \text{ K}^{-2}$. Sabendo que as funções de trabalho do rénio e do tungsténio toriado são de 4,72 e 2,63 eV, respetivamente, verifica-se que à temperatura de 3000 K, o tungsténio toriado emite com uma densidade de corrente 3 ordens de grandeza superior à do rénio.

Os filamentos foram testados nas mesmas condições, medindo-se a corrente de elétrons em função do potencial de extração. Para tal, a corrente aplicada ao filamento manteve-se fixa, o ânodo foi mantido à terra e o potencial aplicado ao filamento foi alterado de 0 a -300 V, medindo-se a corrente de elétrons coletada pelo ânodo. Para se aplicar uma corrente de 2,25 A a cada filamento foi necessário aplicar uma diferença de potencial de 6,77 V no filamento de rênio e 3.41 V para o filamento de tungstênio toriado. As curvas de corrente de elétrons extraída, I_e , em função do potencial de extração, U_{ext} , estão representadas na Figura 4.10. Constatou-se que o filamento em rênio necessita de uma potência muito superior para produzir uma emissão idêntica à do filamento em tungstênio toriado, como foi previsto pela lei de Richardson.

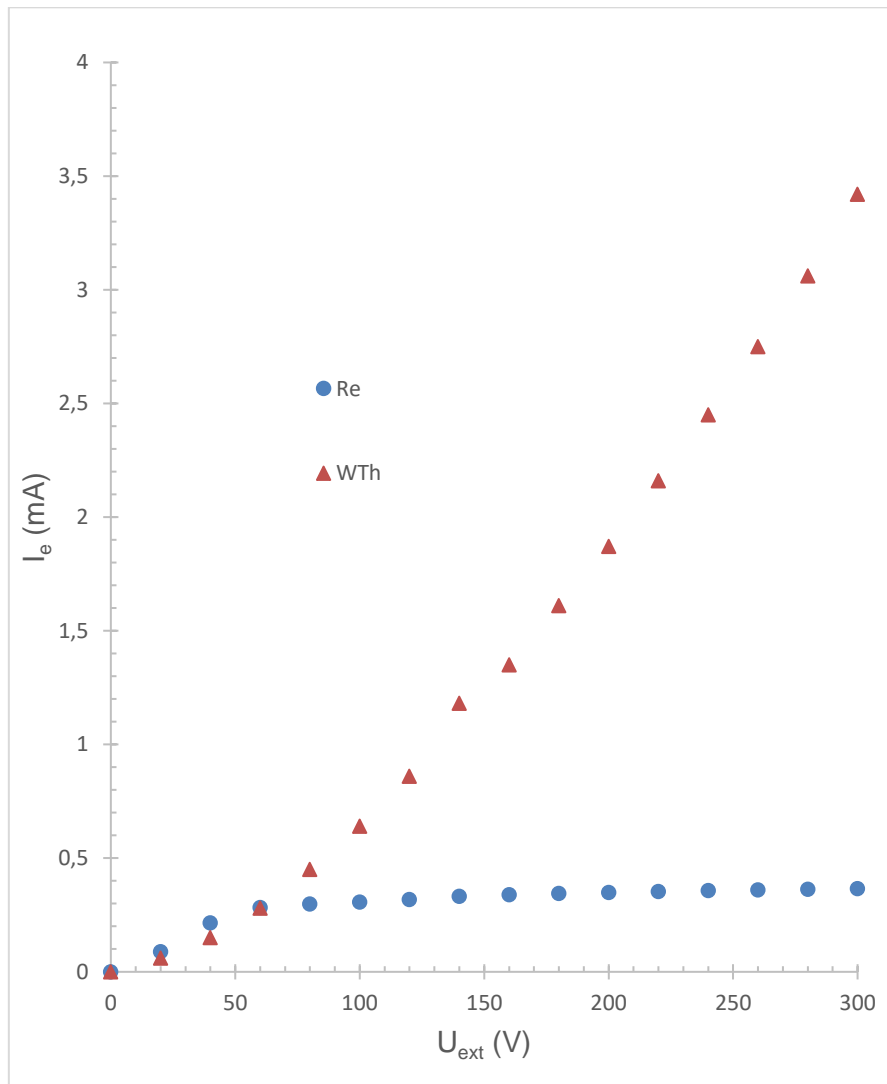


Figura 4.10: Corrente de elétrons extraída do cátodo em função do potencial de extração para cátodos helicoidais em rênio e tungstênio toriado.

De seguida, foi testado o filamento helicoidal em tungstênio toriado montado no Wehnelt. O potencial do Wehnelt foi mantido 2 V mais negativo que o filamento, o que, segundo as simulações, seria o potencial necessário para focar o feixe de elétrons. Com a montagem do

filamento no Wehnelt, o campo elétrico junto à superfície do filamento baixou, reduzindo consideravelmente a corrente de elétrons extraída. Esta verificação levou à necessidade de desenvolver um novo filamento que permitisse uma maior emissão. Foi produzido um terceiro filamento, linear, também em tungstênio toriado com 0,15 mm de espessura. Com este filamento, pretendeu-se reduzir a resistência do filamento para que a emissão termiônica fosse possível com menos potência aplicada. Na Figura 4.11 encontram-se representadas as curvas de corrente elétrons emitida pelo cátodo, I_e , em função do potencial de extração, U_{ext} , para os filamentos helicoidal e linear ao ser-lhes fornecida uma corrente de 2,5 A.

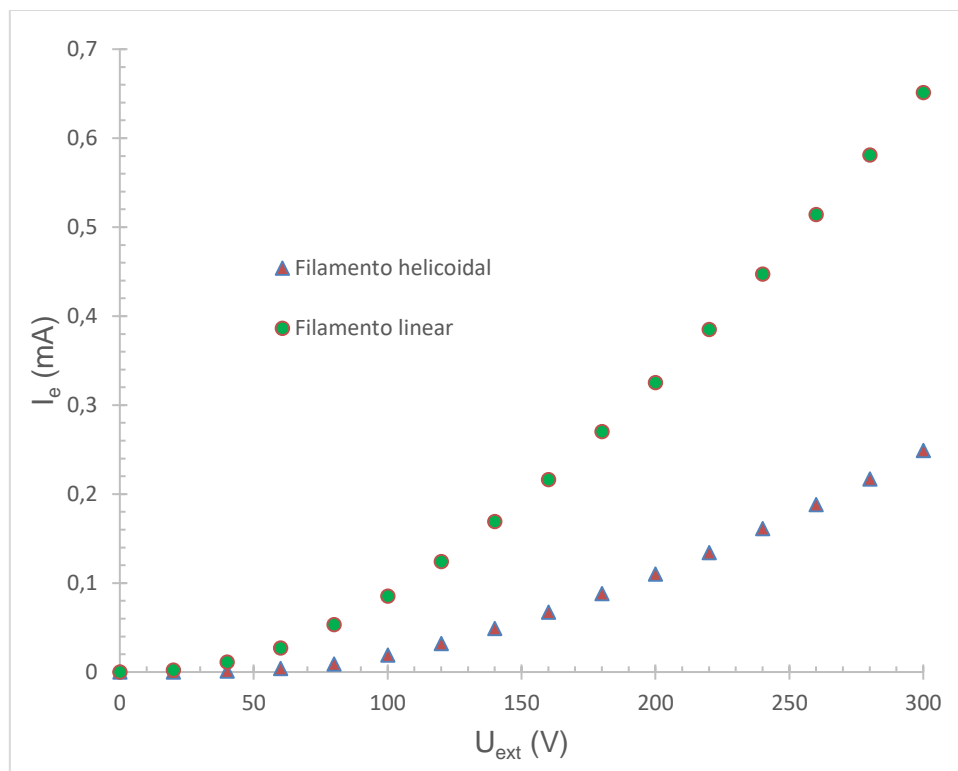


Figura 4.11: Corrente elétrons extraída do cátodo em função do potencial de extração com o Wehnelt montado para os filamentos helicoidal e linear em tungstênio toriado.

O estudo dos cátodos permitiu comparar a corrente de emissão proveniente de materiais e geometrias diferentes em função da potência de aquecimento. O estudo revelou que os filamentos em tungstênio toriado permitem uma maior corrente de emissão para a mesma potência quando comparados com os filamentos em rénio. A produção de um filamento menos sujeito a deformações através de um enrolamento helicoidal em torno de uma haste cerâmica revelou ser uma opção pouco viável, dada a baixa corrente extraída do cátodo. Considerando os resultados obtidos optou-se pelo uso de um filamento linear em tungstênio toriado.

Resultados preliminares e conclusão

5.1 Determinação experimental da sensibilidade

Depois de contruído o manómetro cilíndrico e o controlador eletrónico foi possível elaborar o primeiro teste para determinar a sua sensibilidade. O medidor foi introduzido em alto vácuo e foram aplicados aos elétrodos os potenciais provenientes dos resultados das simulações. Após alguns testes preliminares, revelou-se necessário o ajuste de alguns potenciais, verificando-se a necessidade de aplicar potenciais distintos ao Wehnelt e à rede defletora. Esta necessidade deveu-se ao facto de não se conseguir defletir os eletrões para o interior da gaiola de Faraday com o mesmo potencial do Wehnelt. Na Tabela 5.1 descrevem-se os potenciais aplicados a cada elétrodo do medidor.

Tabela 5.1: Potenciais aplicados do manómetro cilíndrico experimentalmente.

Elétrodo	Cilindro	Cátodo	Wehnelt	Rede supressora	Rede defletora
Potencial (V)	101	-70	-100	-10	-73

Após as correções necessárias foi possível obter a primeira curva de sensibilidade do instrumento. Foi necessário medir a pressão no interior da câmara, usando-se um manómetro tipo Penning. As correntes de eletrões emitidos pelo cátodo e de iões recebidos no coletor, foram medidas em função da pressão na câmara. Na Figura 5.1 pode observar-se a razão entre a corrente de iões coletada e a corrente de eletrões medida pelo cátodo em função da pressão na câmara de vácuo.

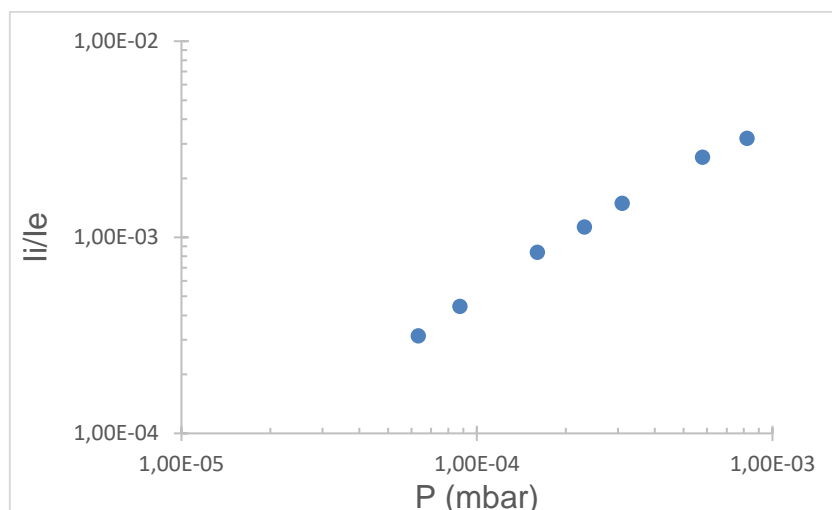


Figura 5.1: Curva obtida experimentalmente com o manómetro cilíndrico da razão entre a corrente de iões coletada e a corrente de eletrões medida pelo cátodo em função da pressão na câmara.

A partir da razão de correntes em função da pressão é possível obter a curva de sensibilidade do manómetro que está representada na Figura 5.2. Verificou-se que a sensibilidade do manómetro neste intervalo de pressão era de $4,75 \text{ mbar}^{-1}$, o que está próximo do valor obtido pela simulação, 9 mbar^{-1} .

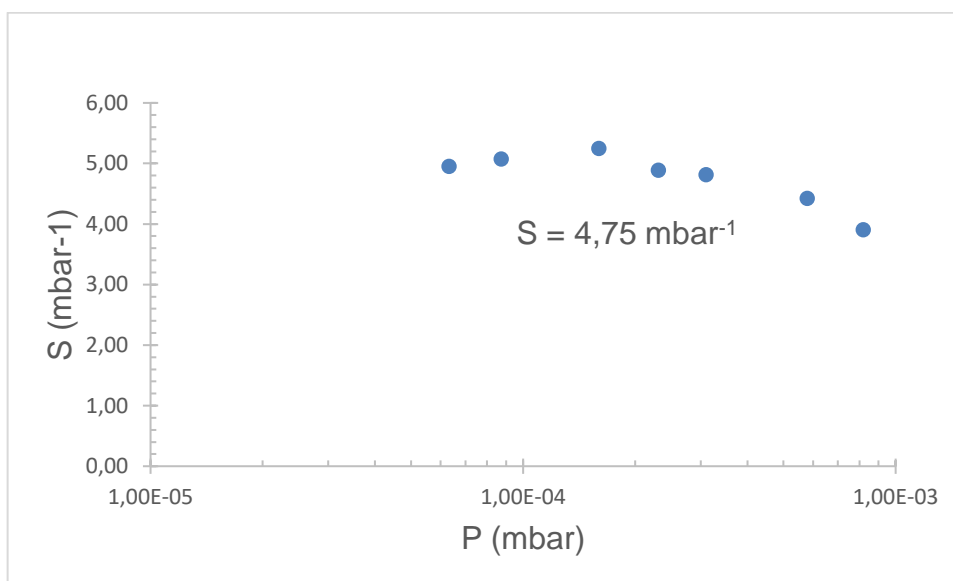


Figura 5.2: Curva de sensibilidade em função da pressão associada ao manómetro cilíndrico; $S = 4,75 \text{ mbar}^{-1}$.

Embora a sensibilidade obtida experimentalmente seja mais baixa que a prevista pelas simulações, deve-se ter em conta que a sensibilidade obtida através da simulação considerou a temperatura ambiente. Este não deverá ser o caso dado que o cátodo se encontra incandescente no interior do medidor fazendo com que a temperatura no interior do manómetro aumente. Tal como descrito anteriormente, o aumento de temperatura traduz-se numa diminuição da

sensibilidade, o que poderá justificar a diferença entre o valor de sensibilidade obtido em simulação e o medido experimentalmente.

5.2 Conclusão

O um novo manómetro de ionização, o cilíndrico, foi estudado e desenvolvido em simulação com o propósito de minimizar as fontes de incerteza presentes nos manómetros de ionização atuais. Em simulação verificou-se a estabilidade na sensibilidade ao introduzir deformações na geometria do medidor e alterações nos seus potenciais. As simulações indicaram uma sensibilidade de cerca de 9 mbar^{-1} .

Com base nas simulações realizadas, foram estudados os pormenores da construção do vacuómetro e foram finalizadas a geometrias dos eléctrodos, tendo em consideração a sua fixação e as ligações elétricas para aplicação e medição de potenciais e correntes.

A realização de testes de cátodos permitiu a escolha do cátodo mais adequado para o medidor. O vacuómetro foi construído e foi desenvolvido um controlador eletrónico para efetuar o seu teste.

Os testes preliminares feitos ao manómetro cilíndrico determinaram uma sensibilidade de $4,75 \text{ mbar}^{-1}$, encontrando-se dentro da ordem de grandeza obtida por simulação.

Futuramente, devem ser estudadas as correntes em cada eléctrodo a fim de refinar os potenciais e eventualmente a geometria de modo a garantir o funcionamento previsto.

A estabilidade do manómetro foi verificada apenas em simulação, pelo que, será necessária a sua verificação experimental. Serão necessárias leituras de pressão a longo prazo comparando os resultados com as medições feitas por um manómetro de alta estabilidade, como o *spinning rotor gauge*.

Caso se comprove a estabilidade do medidor, este poderá ser submetido a pressões mais baixas do que a gama de trabalho na qual foram feitos os primeiros testes, com o objetivo de verificar se a sua sensibilidade se mantém constante. Em caso afirmativo, este poderá ser proposto com um novo vacuómetro para esse intervalo de pressões.

Referências

- [1] K. Jousten, "Handbook of vacuum technology," Wiley-VCH, Ed. Weinheim, Germany, 2016, pp. 565–639.
- [2] N. Academy, "An Ionization Manometer Author (s): O . E . Buckley Source : Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America , Published by : National Academy of Sciences," vol. 2, no. 12, pp. 683–685, 2014.
- [3] NIST, "Atomic Spectra Database Ionization Energies Form." [Em linha]. Disponível em: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/ionEnergy.html>. [Consult.: 27-Jan-2018].
- [4] L. MA, B. KL, G. HB, H. JG, K. AE, and M. M. J. anf Smith FJ, "Recommanned data on the electron impact ionization of atoms and ions: fluorine to nickel," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 17, no. 3, pp. 1285–1363, 1988.
- [5] A. L. Godunov and P. B. Ivanov, "On analytical fits for electron impact ionization cross sections," *Phys. Scr.*, vol. 59, pp. 277–285, 1999.
- [6] K. H. Becker and V. Tarnovsky, "Electron-impact ionization of atoms, molecules, ions and transient species," *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 4, p. 307, 1995.
- [7] SRS, "IGC100 Ion Gauge Controller." SRS, p. 211.
- [8] N. T. Peacock, "Measurement of x-ray currents in Bayard-Alpert type gauges," *J. Vac. Sci. A*, vol. 10, no. 4, 1992.
- [9] J. C. Helmer and W. H. Haywardt, "Ion Gauge for Vacuum Pressure Measurements below 1×10^{-10} Torr," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 37, no. 12, pp. 12–15, 1966.
- [10] W. Jitschin, P. Röhl, G. Grosse, and S. W. Han, "Performance of the bent beam ionization gauge in ultrahigh vacuum measurements," *Vacuum*, vol. 38, no. 12, pp. 1079–1082, 1988.
- [11] H. Akimichi, T. Tanaka, K. Takeuchi, Y. Tuzi, and I. Arakawa, "Development of a new ionization gauge with Bessel Box type energy analyzer," *Vacuum*, vol. 46, no. 8–10, pp.

749–752, 1995.

- [12] J. M. Lafferty, *Transactions of the American Society Symposium*. 1960.
- [13] J. K. Fremerey, “The spinning rotor gauge,” *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 3, no. 3, pp. 1715–1720, 1985.
- [14] A. R. Filippelli and P. J. Abbott, “Long-Term Stability of Bayard-Alpert Gauge Performance: Results Obtained From Repeated Calibrations Against the National Institute of Standards and Technology Primary Vacuum Standard,” *J. Vac. Sci. Technol. A.*, vol. 13, no. 1995, pp. 2582–2586, 1995.
- [15] P. C. Arnold and S. C. Borichevsky, “Nonstable behavior of widely used ionization gauges,” *Vac. Sci. Technol*, vol. 12, no. 32, pp. 2870–2284, 1994.
- [16] I. Scientific Instrument Services, “SIMION® Version 8.1.” [Em linha]. Disponível em: <https://simion.com>. [Consult.: 09-Jul-2018].
- [17] U. Harten, G. Grosse, W. Jitschin, and H. Gentsch, “Surface effects on the stability of hot cathode ionization gauges,” *Vacuum*, vol. 38, no. 3, pp. 167–169, 1988.
- [18] G. Grosse, U. Harten, W. Jitschin, and H. Gentsch, “Secondary electrons in ion gauges,” *J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film.*, vol. 5, no. 5, pp. 3242–3243, 1987.
- [19] M. G. D. H. Yan, M.M. El Gomati, M. Prutton, D. K. Wilkinson, D. P. Chy, “Mc3D : A Three-Dimensional Monte Carlo System Simulating Image Contrast in Surface Analytical Scanning Electron Microscopy I — Object-Oriented Software Design and Tests,” *Scanning*, vol. 20, pp. 465–484, 1998.
- [20] NIST, “Electron-Impact Cross Sections for Ionization and Excitation.” [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Ionization/molTable.html>. [Accessed: 26-Mar-2018].
- [21] B. Jeninger, CERN, Comunicação privada.
- [22] P. Juda, B. Jenninger, P. Chiggiato, and T. Richard, “3D-simulation of ionisation gauges and comparison with measurements,” *Vacuum*, vol. 138, pp. 173–177, 2017.



Apêndice 1 Detalhes dos modelos de simulação

Em SIMION, as simulações das trajetórias das partículas são calculadas em pequenos passos. Em cada passo as partículas deslocam-se Δl no espaço de simulação. Para fazer a simulação da ionização é necessária a escolha do passo no qual o eletrão é transformado num ião com velocidade diferente.

Dado que a probabilidade de um eletrão provocar a ionização é extremamente baixa, no Modelo 2 de simulação é assumido que cada trajetória de eletrão corresponde a um feixe de N eletrões. Deste modo, aumenta-se a probabilidade de formação de um ião ao longo de toda a trajetória do feixe. A probabilidade de formação de n iões através de um feixe de N é dada pela distribuição binomial

$$P(N, n) = \binom{N}{n} p_1(L)^n \cdot (1 - p_1(L))^{N-n} \quad (\text{A.1})$$

onde p_1 representa a probabilidade de um eletrão provocar a ionização numa trajetória de comprimento L . Na expressão acima apenas é considerada a probabilidade de uma trajetória, que agora representa um feixe, formar um único ião mais a probabilidade de formar zero iões. Os restantes casos são desprezados dada a pequena probabilidade de tal acontecer. O valor de N é definido de forma a que a probabilidade de formar um único ião mais a de não formar iões seja de 99%, ou seja:

$$P(N, 0) + P(N, 1) = (1 - p_1(L))^N + p_1(L) \cdot (1 - p_1(L))^{N-1} > \varepsilon, \varepsilon = 0,99 \quad (\text{A.2})$$

No caso do Modelo 2 de simulação, em que as probabilidades de ionização consideram a energia cinética dos eletrões constante de 100 eV, p_1 é dado por

$$p_1(L) = 1 - e^{-\frac{L}{\lambda}} \quad (\text{A.3})$$

sendo λ a distância percorrida por um eletrão entre duas colisões, dada por

$$\lambda = \frac{1}{n \cdot \sigma} \quad (\text{A.4})$$

onde n representa a concentração de átomos ou moléculas e $\sigma(E)$ a secção eficaz de ionização em função da energia dos eletrões.

No Modelo 3 foi considerada a diferente energia dos eletrões ao longo da sua trajetória no cálculo da secção eficaz. Para tal, p_1 deixa de ser calculado pela expressão simplificada descrita anteriormente e passa a ser dado pela seguinte expressão

$$p_1(L) = 1 - e^{-n \int_0^L \sigma dx} \quad (\text{A.5})$$

onde x representa a distância ao longo da trajetória do feixe de eletrões. Este modelo obriga ao cálculo de N para cada uma das trajetórias individualmente dado que a energia dos eletrões ao longo da sua trajetória é diferente em cada trajetória. Como tal, foi simulada cada trajetória duas vezes, a primeira para calcular iterativamente o integral da secção eficaz ao longo de toda a trajetória e por sua vez N , e uma segunda vez para realizar a simulação depois de conhecido o N .

Em ambos os modelos, a cada passo, que corresponde a um deslocamento de Δl das partículas do feixe, a probabilidade de formação de um ião é dada por

$$N \cdot p_1(\Delta l) \cdot (1 - p_1(\Delta l))^{N-1} \quad (\text{A.6})$$

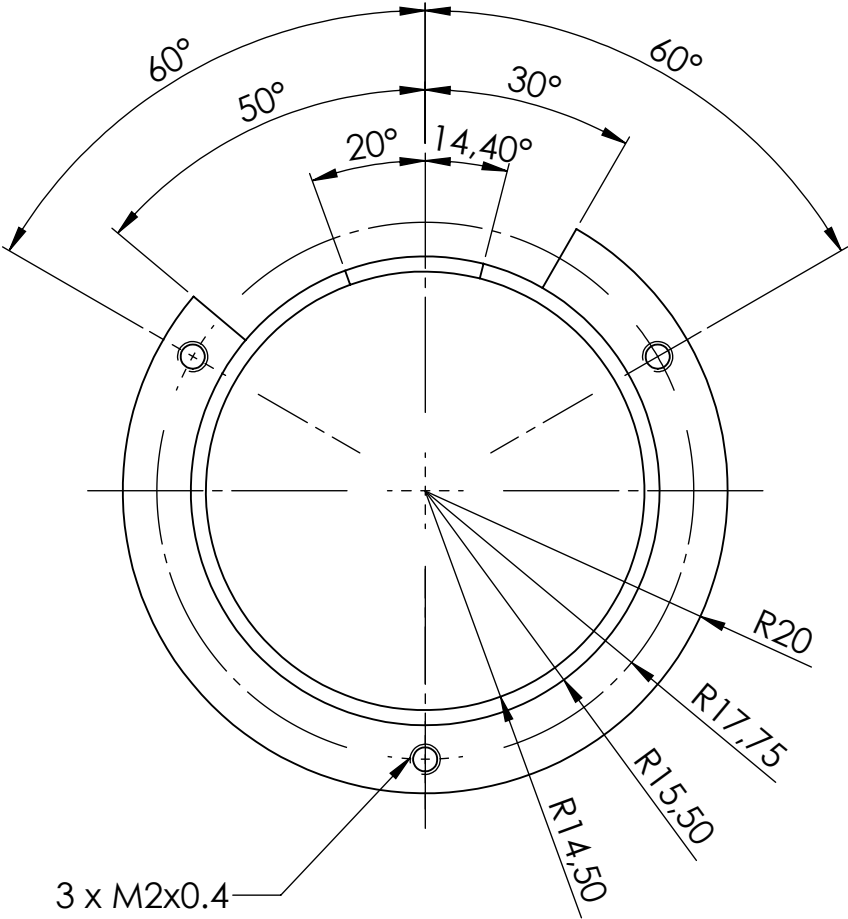
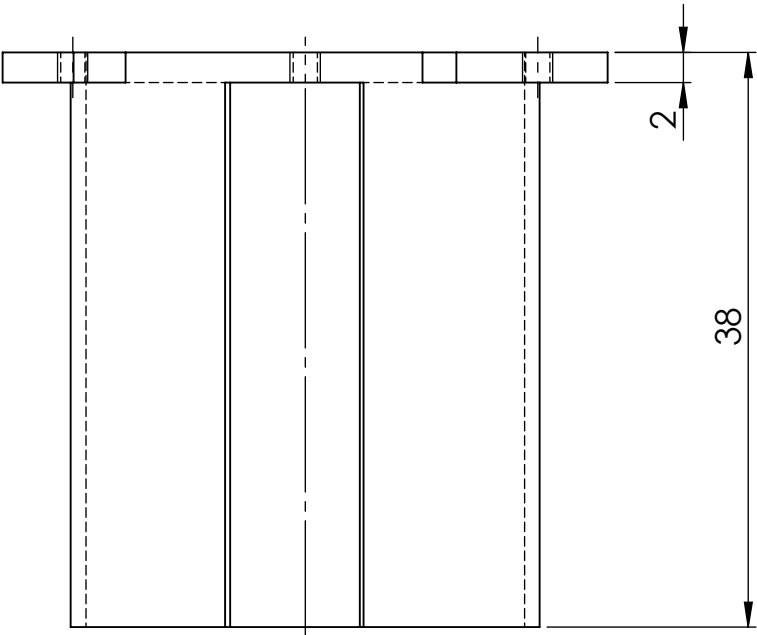
que é derivado diretamente da Equação (A.2). A simulação é feita seguindo o método de Monte Carlo e uma vez dada a ionização da partícula é criado nesse ponto um ião com velocidade que segue a distribuição de Maxwell-Boltzmann.

Anexo



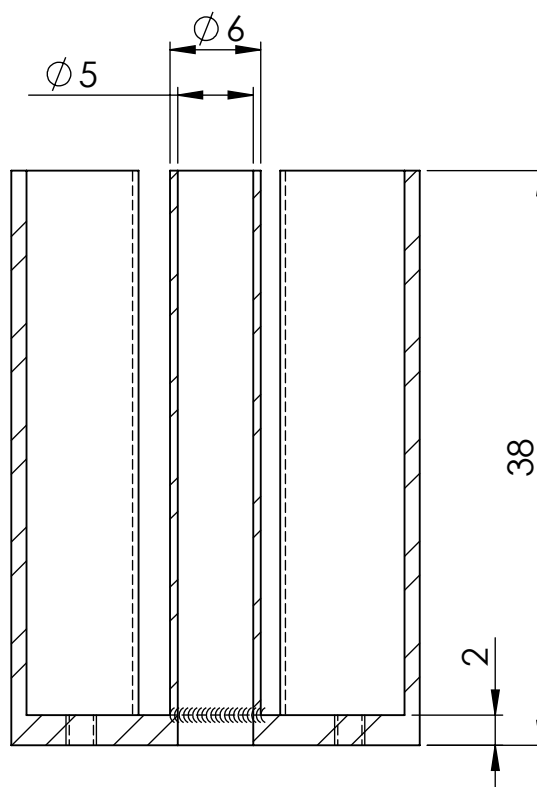
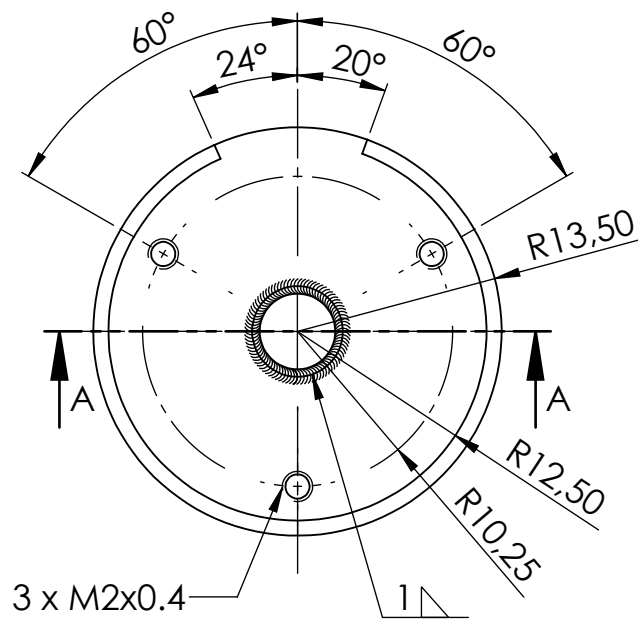
Anexo 1 Desenhos técnicos

Proj.	Jan. 2018		MANÓMETRO DE IONIZAÇÃO CILÍNDRICO	FCT-UNL RICARDO A. S. SILVA
Des.	Mar. 2018			
Visto				



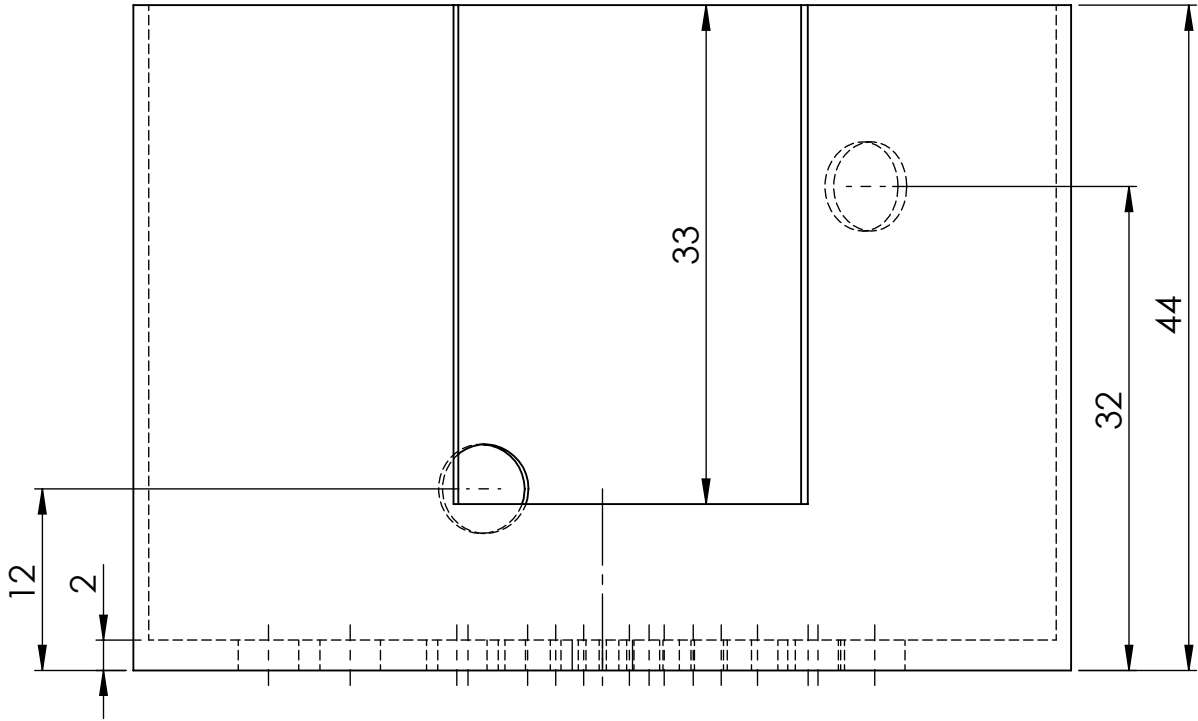
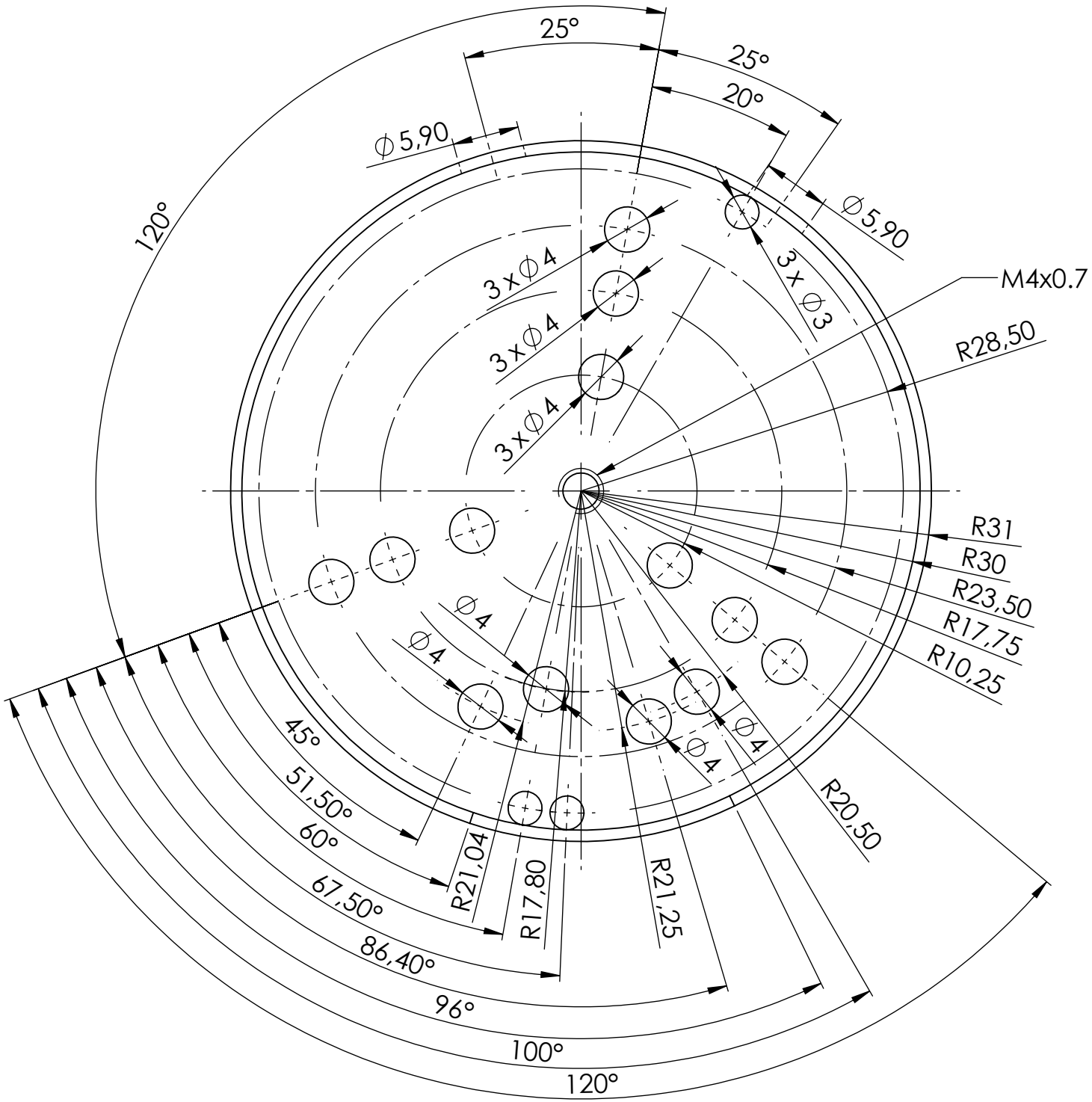
	2:1	CYLINDER	DES. Nº 2018.1.1					

Proj.	Jan. 2018		MANÓMETRO DE IONIZAÇÃO CILÍNDRICO	FCT-UNL RICARDO A. S. SILVA
Des.	Mar. 2018			
Visto				



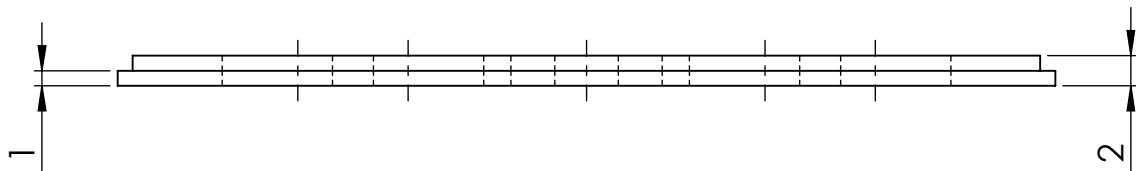
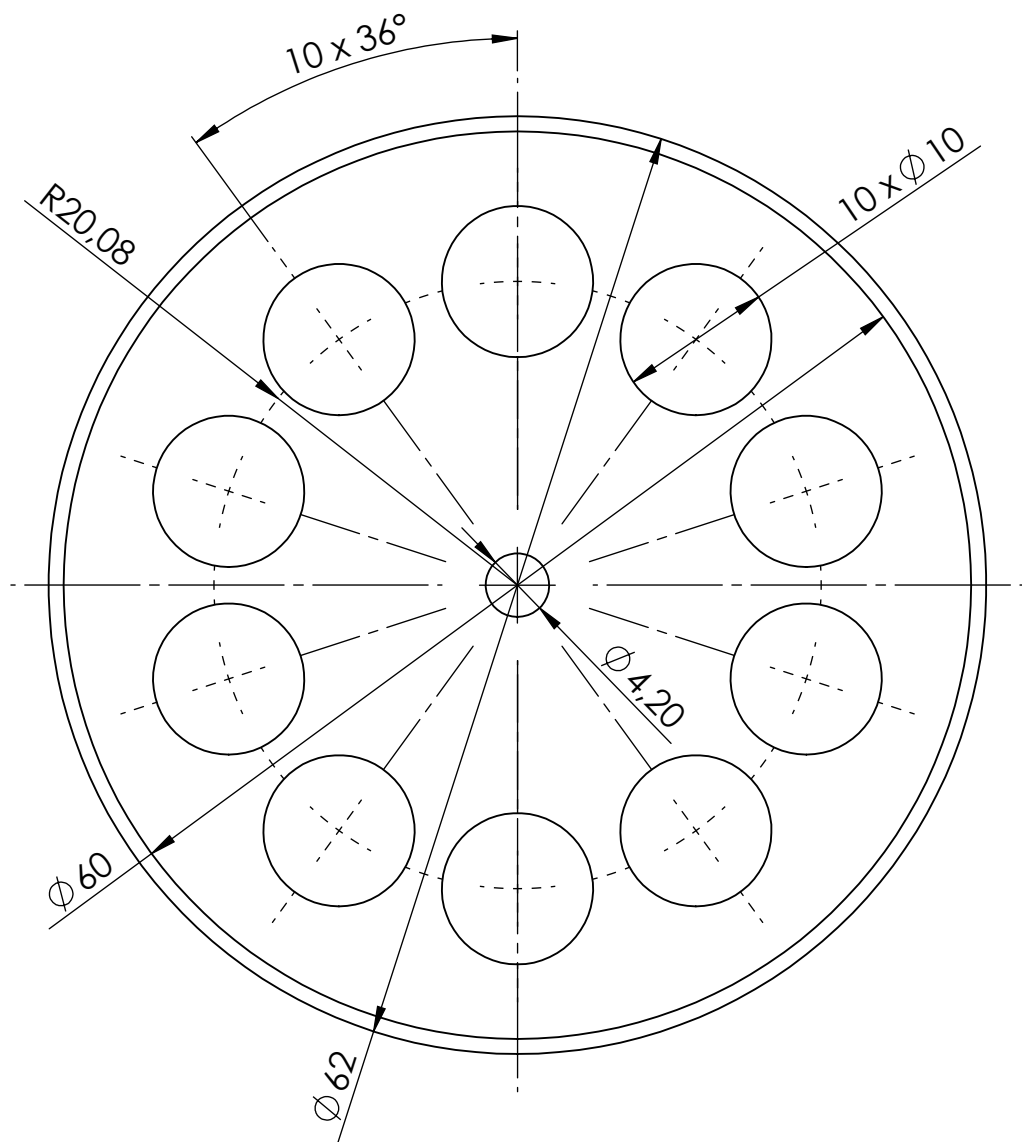
CORTE A-A

	2:1	ELECTRON COLLECTOR	DES. N° 2018.1.2

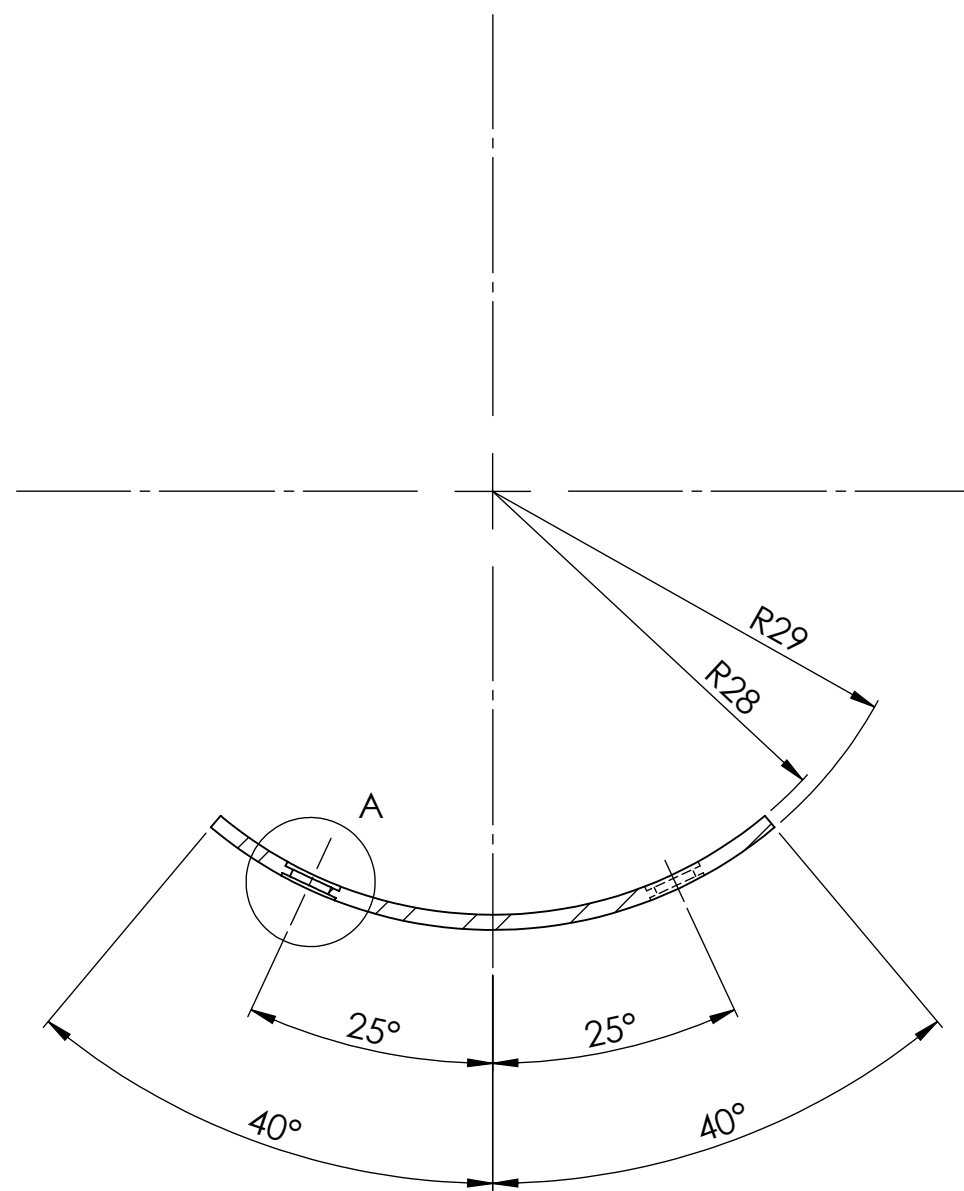
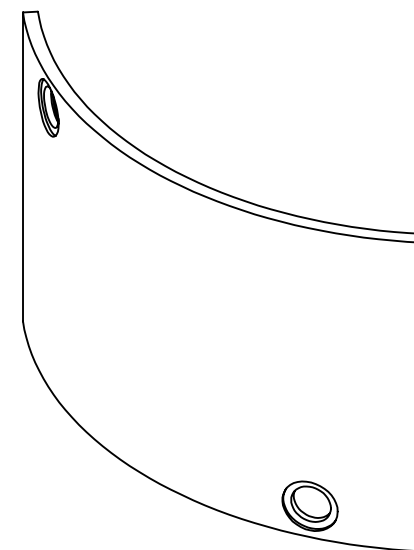
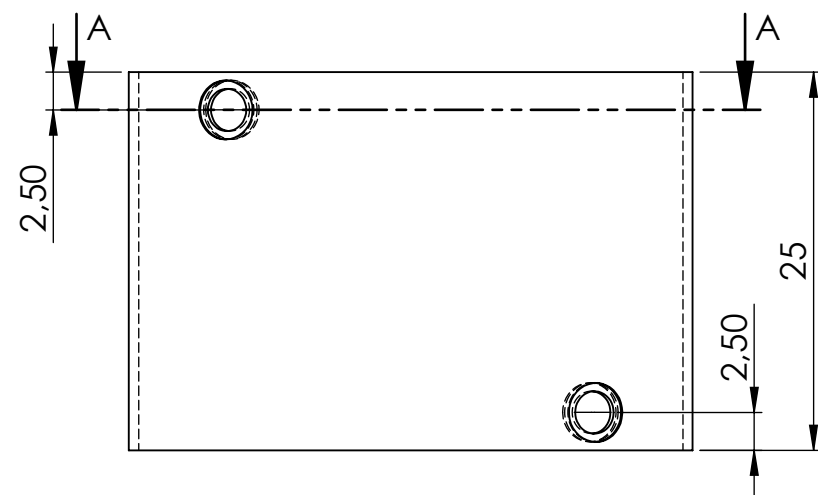


Proj.	Jan. 2018		MANÓMETRO DE IONIZAÇÃO CILÍNDRICO	FCT-UNL							
Des.	Mar. 2018			RICARDO A. S. SILVA							
Visto											
			2:1	ENVELOPE	DES. Nº 2018.1.3						

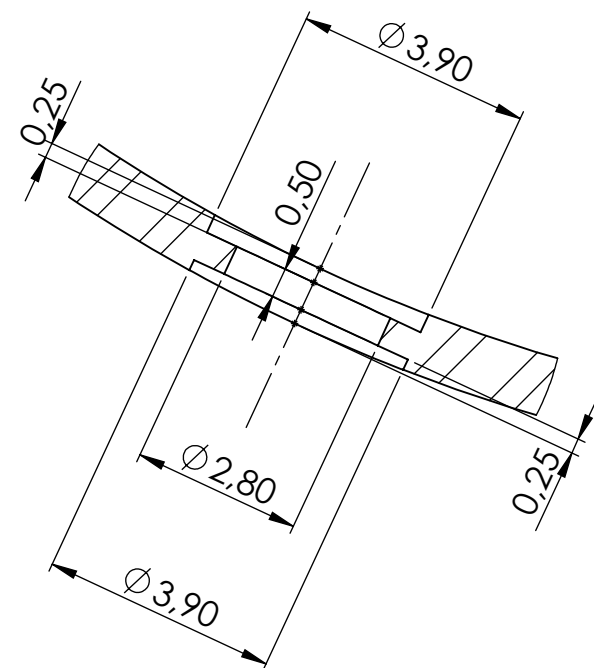
Proj.	Jan. 2018		MANÓMETRO DE IONIZAÇÃO CILÍNDRICO	FCT-UNL RICARDO A. S. SILVA
Des.	Mar. 2018			
Visto				



	2:1	SHIELD	DES. N° 2018.1.4



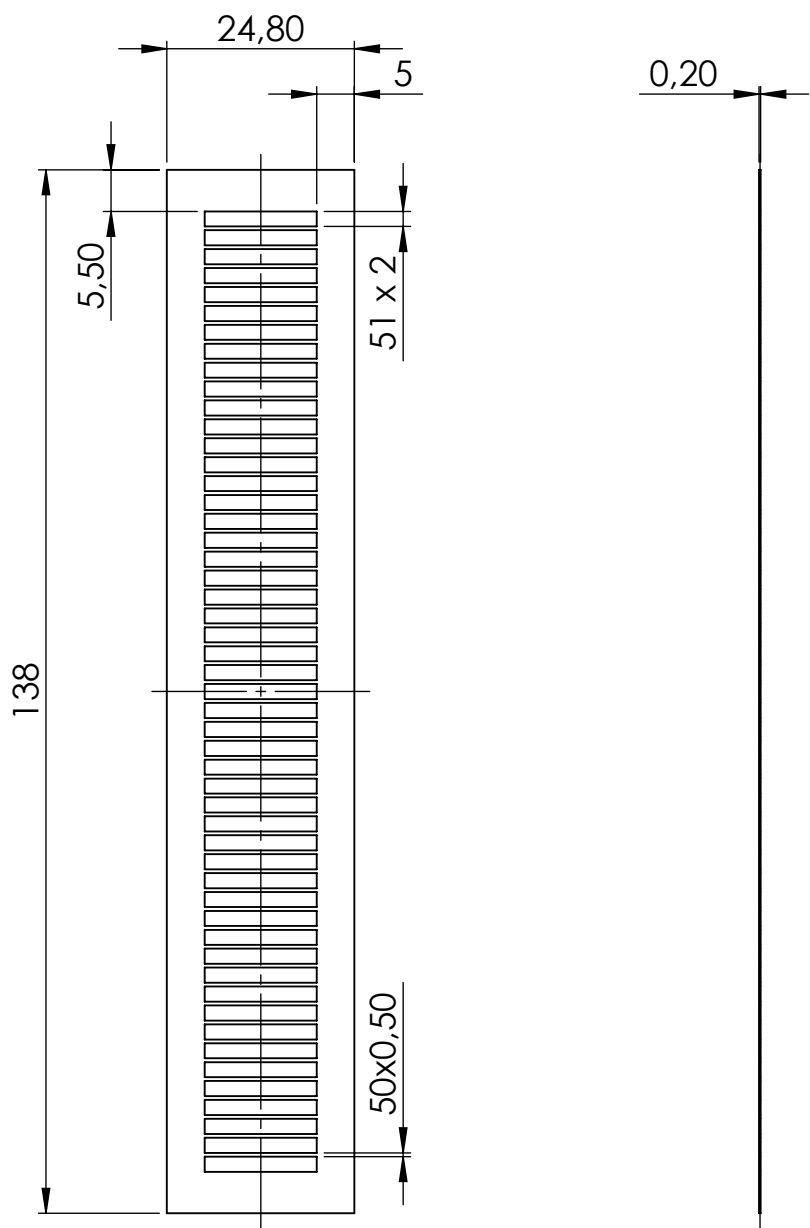
CORTE A-A



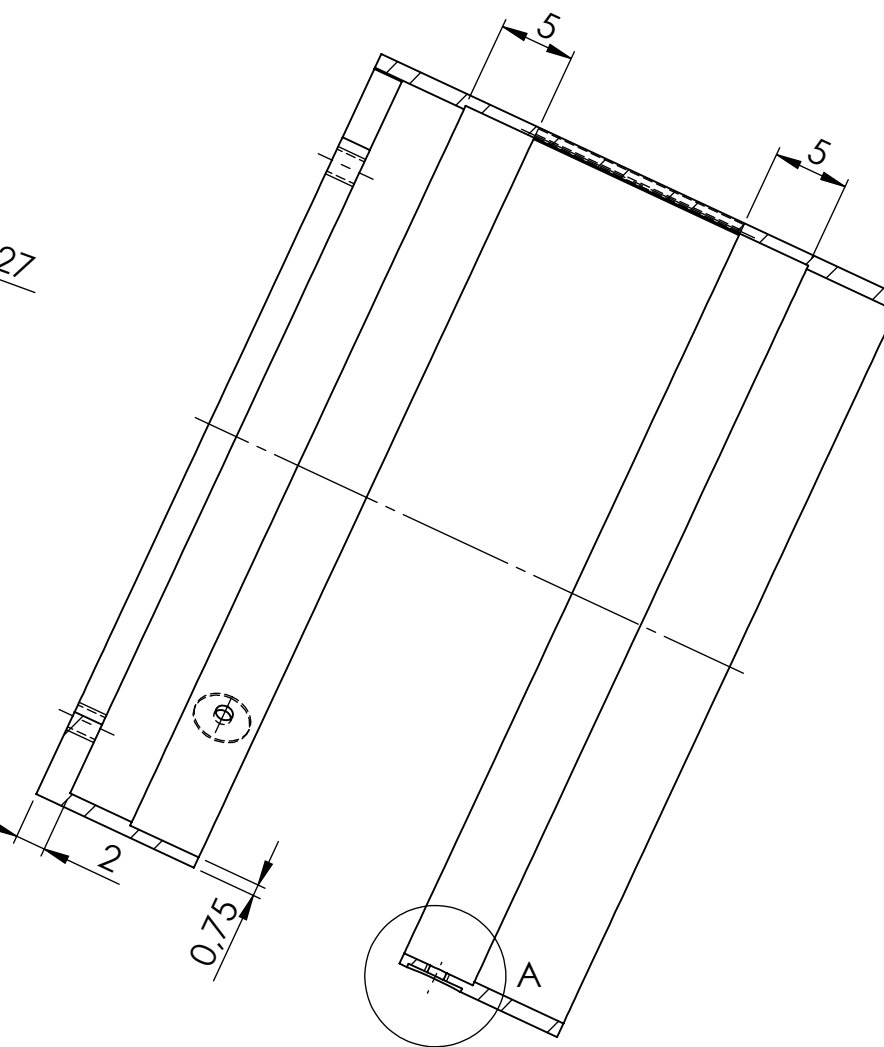
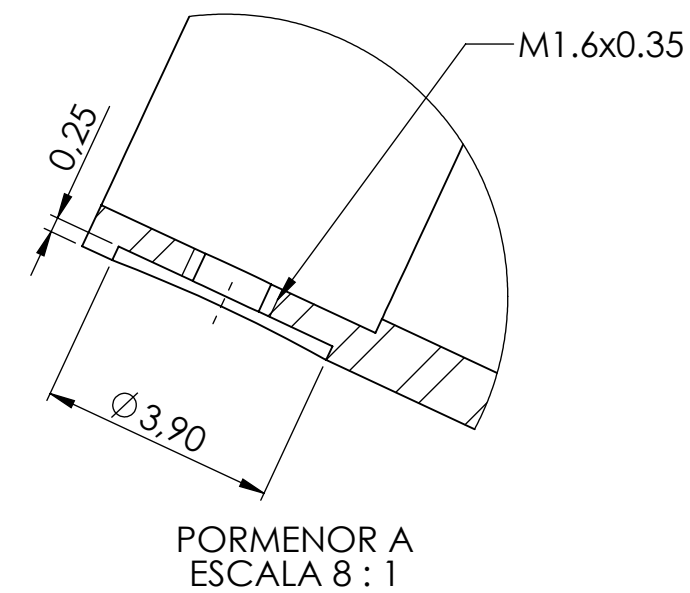
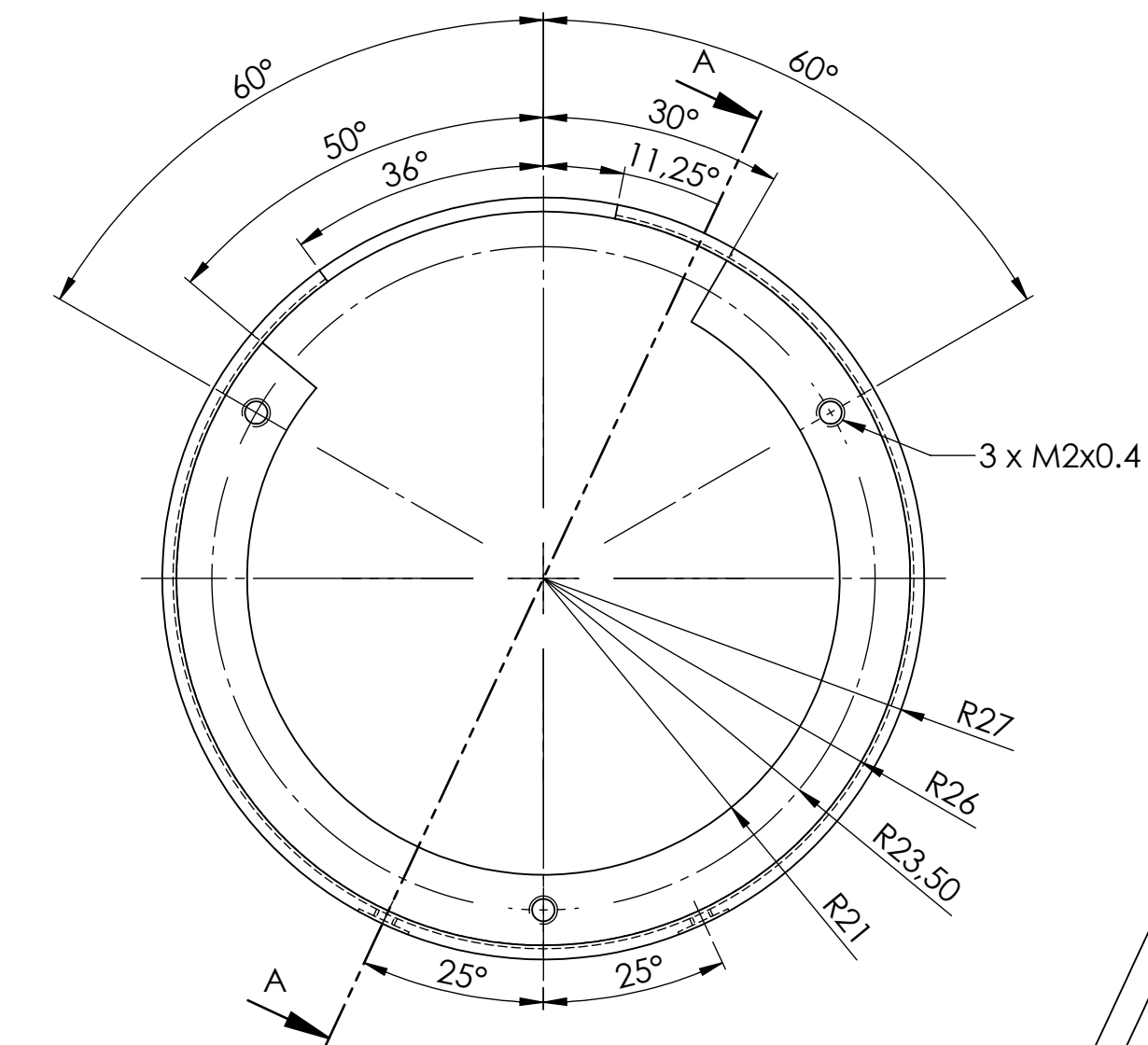
PORMENOR A
ESCALA 8 : 1

Proj.	Jan. 2018		MANÓMETRO DE IONIZAÇÃO CILÍNDRICO	FCT-UNL					
Des.	Mar. 2018			RICARDO A. S. SILVA					
Visto									
		2:1	ION COLLECTOR	DES. Nº 2018.1.5					

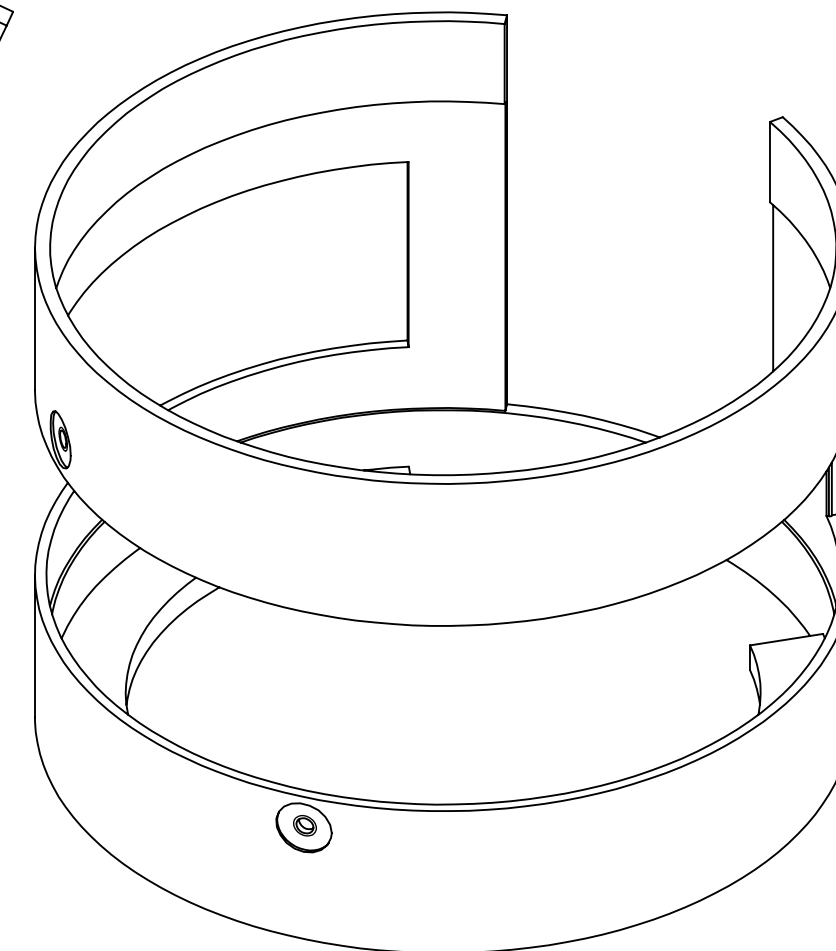
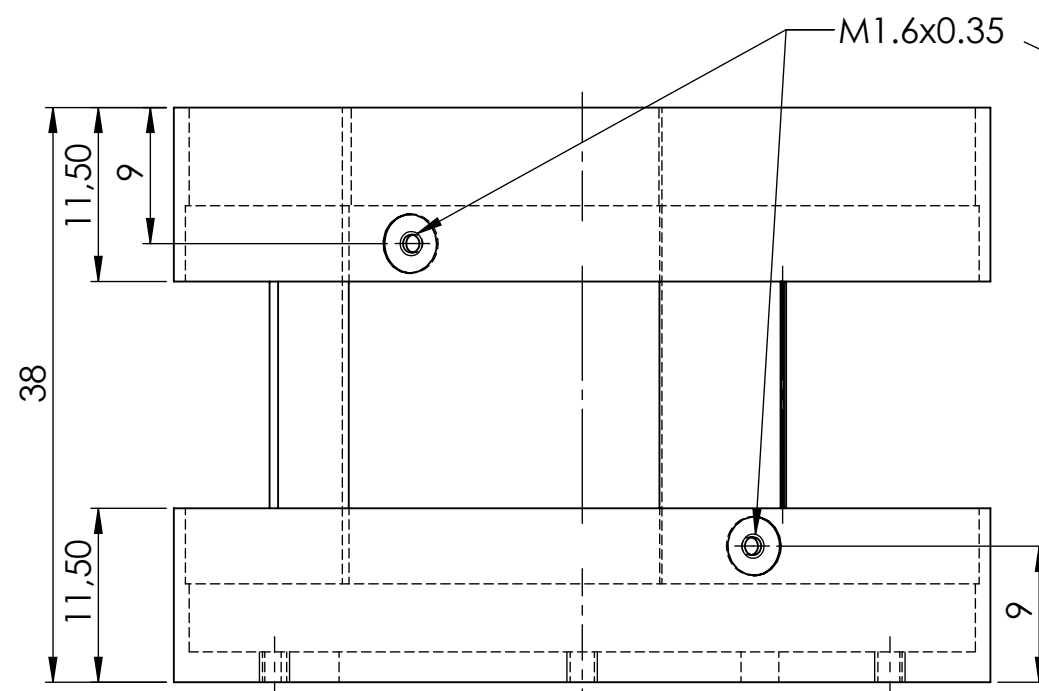
<i>Proj.</i>	Jan. 2018		<i>MANÓMETRO DE IONIZAÇÃO CILÍNDRICO</i>	<i>FCT-UNL</i> <i>RICARDO A. S. SILVA</i>
<i>Des.</i>	Mar. 2018			
<i>Visto</i>				



	2:1	<i>SUPPRESSOR</i> <i>GRID</i>	<i>DES. N° 2018.1.6</i>					

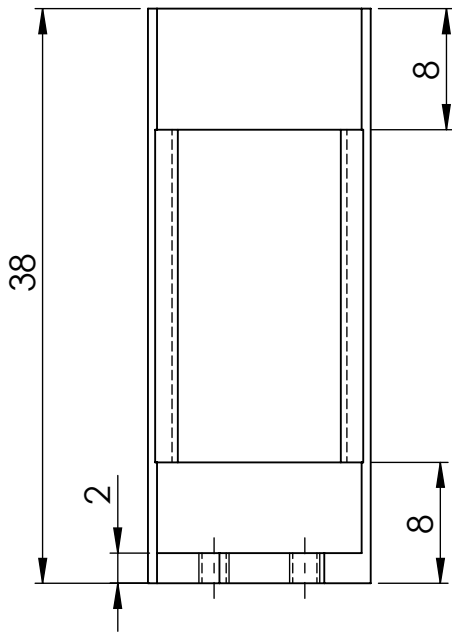
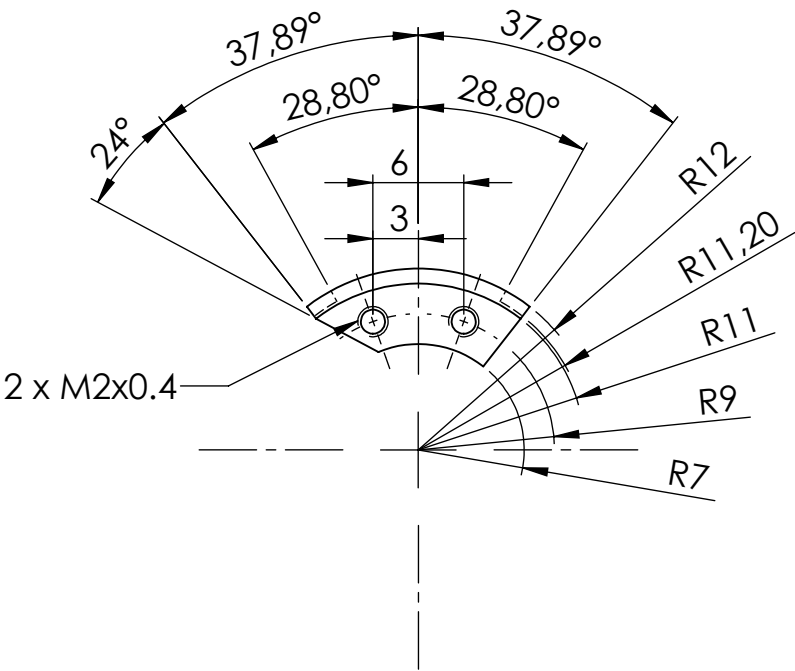


CORTE A-A



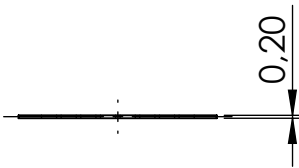
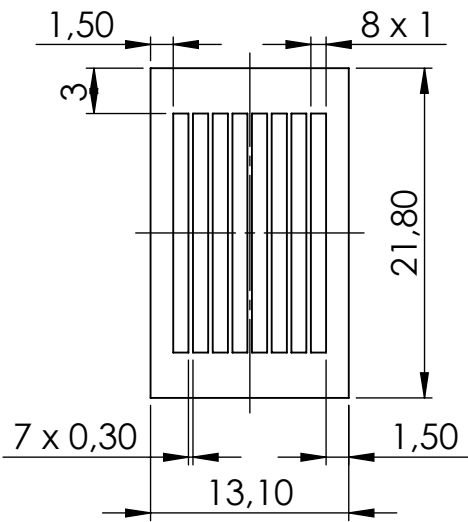
Proj.	Jan. 2018		MANÓMETRO DE IONIZAÇÃO CILÍNDRICO	FCT-UNL	
Des.	Mar. 2018			RICARDO A. S. SILVA	
Visto				DES. Nº 2018.1.7	
		2:1	SUPPRESSOR SUPPORT		

Proj.	Jan. 2018		MANÓMETRO DE IONIZAÇÃO CILÍNDRICO	FCT-UNL RICARDO A. S. SILVA
Des.	Mar. 2018			
Visto				



	2:1	DEFLECTOR SUPPORT	DES. Nº 2018.1.8

<i>Proj.</i>	Jan. 2018		<i>MANÓMETRO DE IONIZAÇÃO CILÍNDRICO</i>	<i>FCT-UNL</i> <i>RICARDO A. S. SILVA</i>
<i>Des.</i>	Mar. 2018			
<i>Visto</i>				

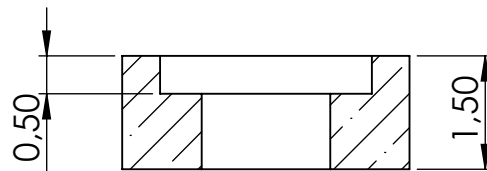


	5:1	<i>DEFLECTOR GRID</i>	<i>DES. Nº 2018.1.9</i>

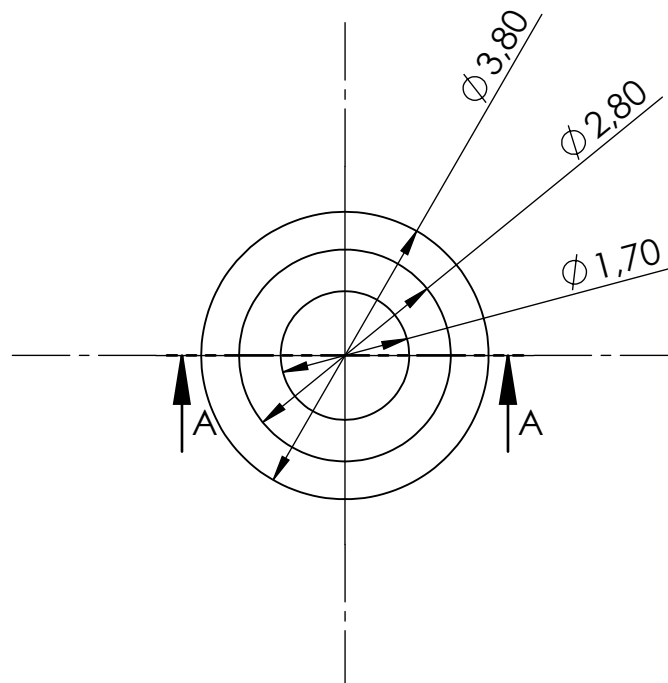


Proj.	Jan. 2018	MANÓMETRO DE IONIZAÇÃO CILÍNDRICO	FCT-UNL				
Des.	Mar. 2018		RICARDO A. S. SILVA				
Visto							
		2:1	DES. Nº 2018.1.10				
		MONTAGEM MANÓMETRO					

<i>Proj.</i>	Jan. 2018		<i>MANÓMETRO DE IONIZAÇÃO CILÍNDRICO</i>	<i>FCT-UNL</i> <i>RICARDO A. S. SILVA</i>
<i>Des.</i>	Mar. 2018			
<i>Visto</i>				

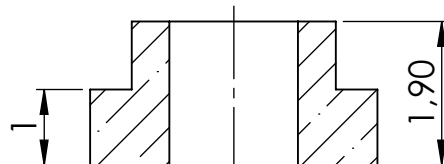


CORTE A-A

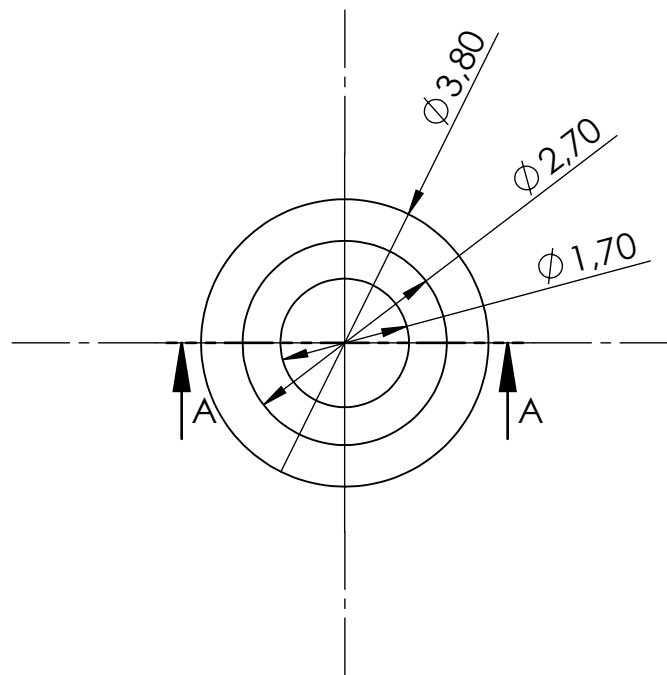


	10:1	<i>SPLIT BUSH FEMALE</i> <i>M1.6 CUT</i>	<i>DES. Nº 2018.1.11</i>					

Proj.	Jan. 2018		MANÓMETRO DE IONIZAÇÃO CILÍNDRICO	FCT-UNL RICARDO A. S. SILVA
Des.	Mar. 2018			
Visto				

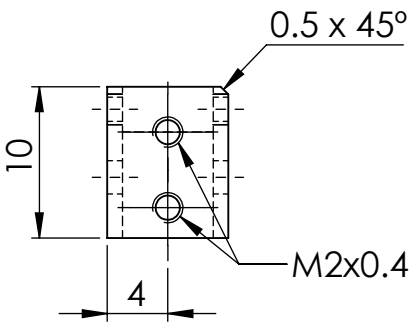
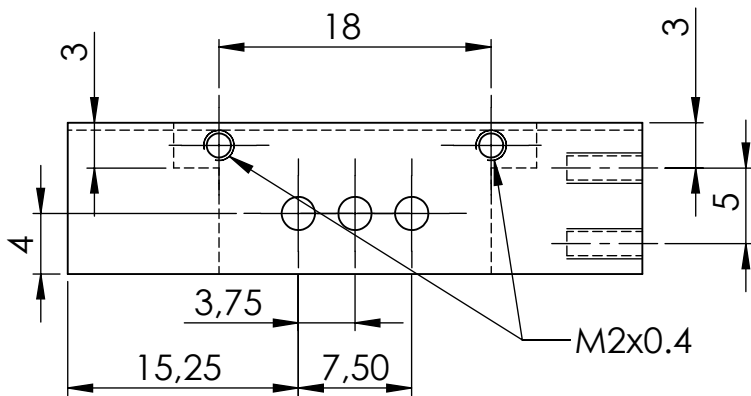
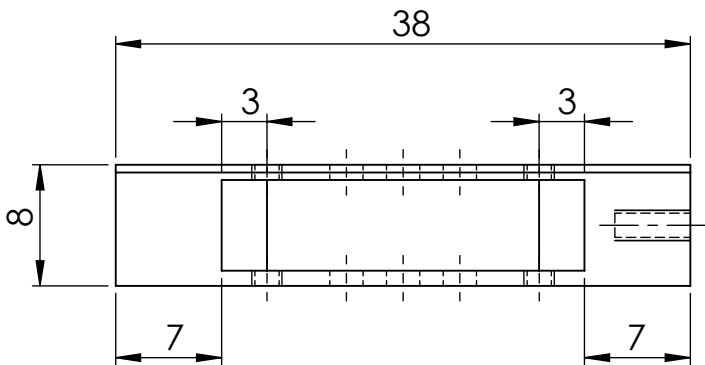
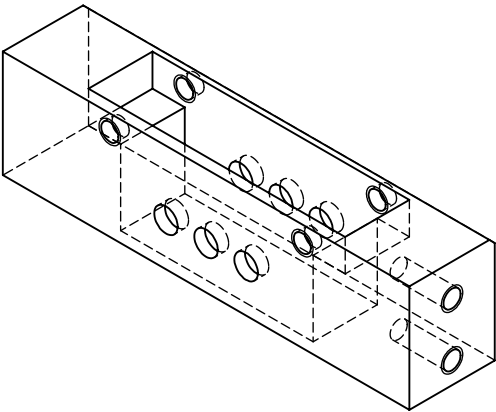


CORTE A-A



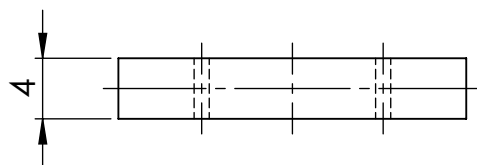
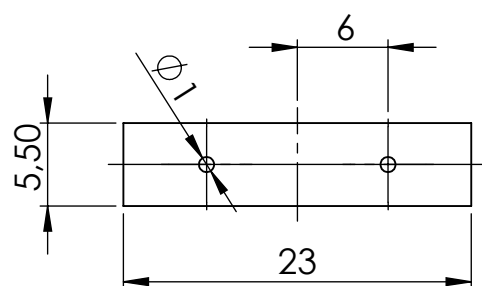
	10:1	SPLIT BUSH MALE M1.6 CUT	DES. Nº 2018.1.12

Proj.	Jan. 2018		MANÓMETRO DE IONIZAÇÃO CILÍNDRICO	FCT-UNL RICARDO A. S. SILVA
Des.	Mar. 2018			
Visto				



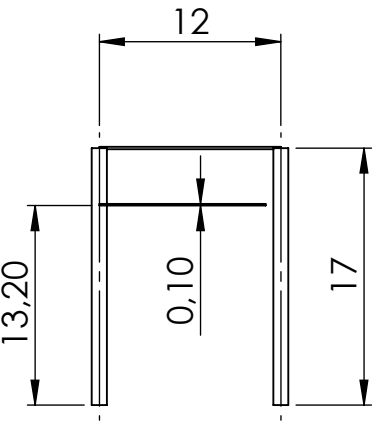
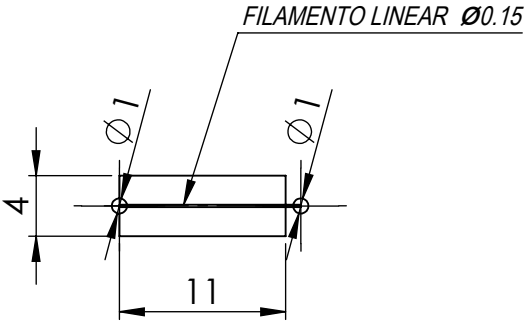
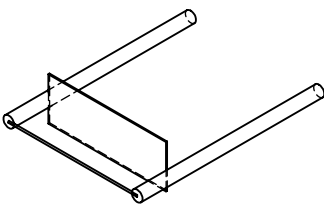
	2:1	WEHNELT	DES. Nº 2018.1.13					

<i>Proj.</i>	Jan. 2018		<i>MANÓMETRO DE IONIZAÇÃO CILÍNDRICO</i>	<i>FCT-UNL</i> <i>RICARDO A. S. SILVA</i>
<i>Des.</i>	Mar. 2018			
<i>Visto</i>				

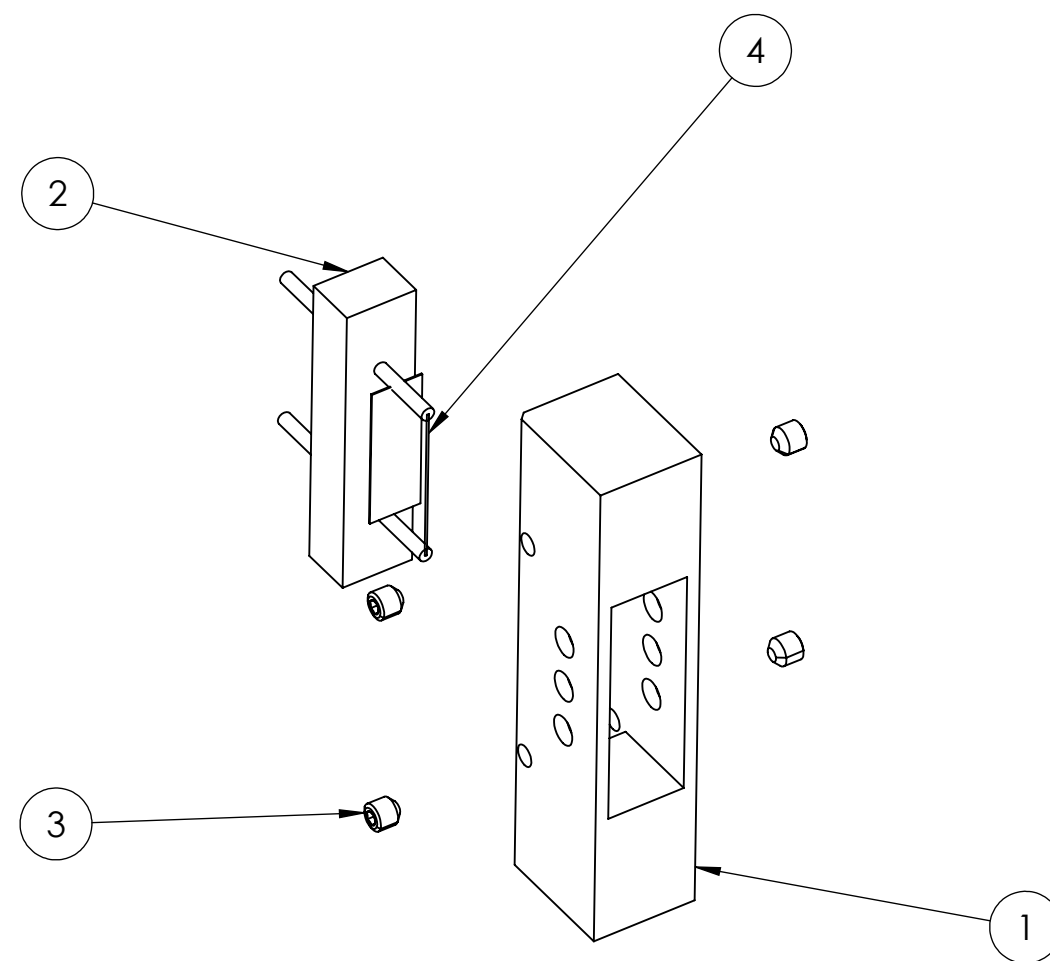
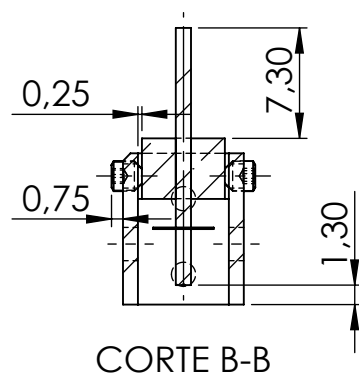
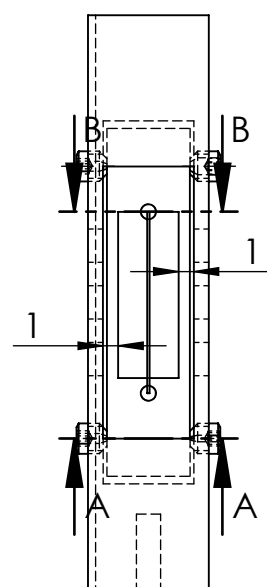
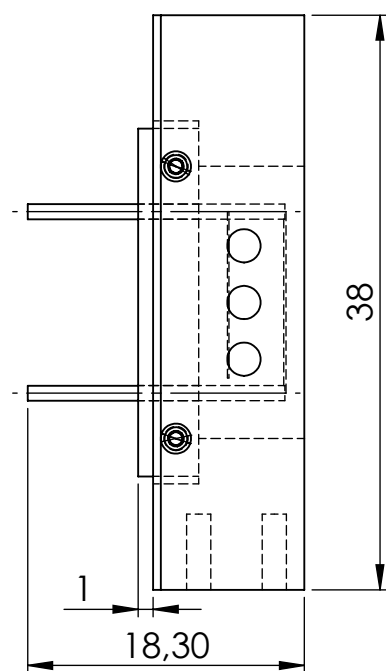
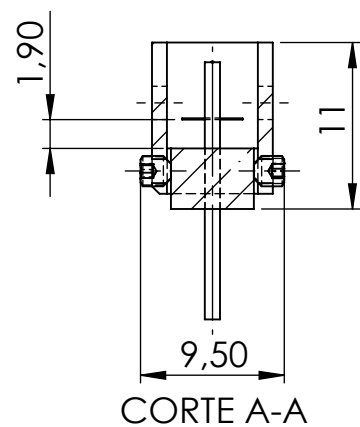


	2:1	<i>FILAMENT SUPPORT</i>	<i>DES. N° 2018.1.14</i>					

Proj.	Jan. 2018		MANÓMETRO DE IONIZAÇÃO CILÍNDRICO	FCT-UNL RICARDO A. S. SILVA
Des.	Mar. 2018			
Visto				



	2:1	FILAMENT AND BACKPLATE	DES. Nº 2018.1.15					



1	FILAMENT AND BACKPLATE	2018.1.15	Stainless Steel	4		0,24	
4	SCREW SOCKET M2X2 DIN913		Stainless Steel	3		0,04	
1	FILAMENT SUPPORT	2018.1.14	Ceramic Porcelain	2		1,15	
1	WEHNELT	2018.1.13	Stainless Steel	1		14,01	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº DO DESENHO	MATERIAL	Nº REF.	PRODUTO SEMI-ACABADO	PESO	OBSERVAÇÕES
Proj.	Jan. 2018		MANÓMETRO DE IONIZAÇÃO CILÍNDRICO			FCT-UNL RICARDO A. S. SILVA	
Des.	Mar. 2018						
Visto							
		2:1	MONTAGEM FILAMENTO			DES. Nº 2018.1.16	



Anexo 2 Ficha técnica do módulo EMCO CA02

**Proven
Reliability**

CA SERIES

PRECISION REGULATED, LOW RIPPLE HIGH VOLTAGE DC TO DC CONVERTERS

200V to 2000V @ 1 Watt

**NOW
UL RECOGNIZED**



PRODUCT DESCRIPTION

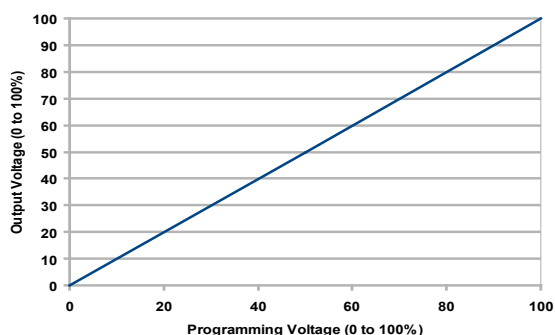
Precision regulated, very low noise, high performance high voltage power supplies are fully programmable (0 to 100%) and feature high voltage monitor readback, on-board precision reference, wide input voltage range and protection against arcs and short circuits all in a miniature, shielded case. Please refer to our CA-T series data sheet for extended temperature.

PRODUCT SELECTION TABLE

MODEL	OUTPUT VOLTAGE (POSITIVE OR NEGATIVE)	MAXIMUM OUTPUT CURRENT ¹
CA02	0 to 200V	0 to 5 mA
CA05	0 to 500V	0 to 2 mA
CA10	0 to 1,000V	0 to 1mA
CA12	0 to 1,250V	0 to 0.8 mA
CA20	0 to 2,000V	0 to 0.5 mA

Complete List of Models on page 2

Programming Voltage vs Output Voltage



FEATURES

- Very Low Ripple, as low as 5PPM!
- Precision Regulated
- Miniature Shielded Case, 1 cubic inch
- 0 to 100% Programmable output
- Voltage Monitor/ Readback
- High Stability, typically <25ppm/°C
- Wide Input Voltage Range
- Arc, Short Circuit Protected
 - 12 Vin; indefinite
 - 5 Vin; short duration, up to 1 minute
- Very Low EMI/RFI
- Precision On board Reference
- External Voltage or Potentiometer Programming
- Accessible Calibration Adjustment
- Sealed To Withstand Immersion Cleaning Processes
- Designed to meet the requirements of UL1950
- Proven Reliability, MTBF: >2.10 million hrs per Bellcore TR-332
- RoHS Compliant
- UL Recognized

APPLICATIONS

Photomultiplier Tubes
Avalanche Photodiodes
Solid State Detectors
Electrophoresis
EO Lenses
Piezo Devices
Capacitor Charging

OPTIONS

- Available with a 5VDC input voltage

ISO 9001:2008
CERTIFIED

ISO 14001:2004
CERTIFIED

RoHS
COMPLIANT

UL
E139109

CE

IPC
Certified J-STD-001
Application Specialist

ELECTRICAL SPECIFICATIONS*² CA02 - CA20 (200V to 2000V)

OUTPUT VOLTAGE	MODEL	MAXIMUM OUTPUT CURRENT*1	RIPPLE P-P FULL-LOAD*3	REGULATION		FREQUENCY*3
				LOAD 0 TO 100%*3	LINE 11.5 TO 15.5V*3	
12 VDC INPUT MODELS						
0 to +200V	CA02P	0 to 5 mA	<0.01 %	<0.05 %	<0.01 %	80 - 180 kHz
0 to -200V	CA02N	0 to 5 mA	<0.01 %	<0.05%	<0.01%	80 - 230 kHz
0 to +500V	CA05P	0 to 2 mA	<0.01 %	<0.01 %	<0.01%	200 - 400 kHz
0 to -500V	CA05N	0 to 2 mA	<0.01 %	<0.01 %	<0.01 %	100 - 250 kHz
0 to +1,000V	CA10P	0 to 1 mA	<0.001 %	<0.005 %	<0.001 %	80 - 250 kHz
0 to -1,000V	CA10N	0 to 1mA	<0.001 %	<0.005 %	<0.001 %	100 - 250 kHz
0 to +1,250V	CA12P	0 to 0.8 mA	<0.0005 %	<0.005 %	<0.001 %	80 - 250 kHz
0 to -1,250V	CA12N	0 to 0.8 mA	<0.0005 %	<0.005 %	<0.001 %	80 - 250 kHz
0 to +2,000V	CA20P	0 to 0.5 mA	<0.001 %	<0.01 %	<0.01 %	80 - 250 kHz
0 to -2,000V	CA20N	0 to 0.5 mA	<0.001 %	<0.01 %	<0.01 %	100 - 250 kHz
5 VDC INPUT MODELS						
0 to +200V	CA02P-5	0 to 5 mA	<0.01 %	<0.01 %	<0.01 %	100 - 250 kHz
0 to -200V	CA02N-5	0 to 5 mA	<0.01 %	<0.005 %	<0.003 %	100 - 250 kHz
0 to +500V	CA05P-5	0 to 2 mA	<0.005 %	<0.003 %	<0.002 %	100 - 250 kHz
0 to -500V	CA05N-5	0 to 2 mA	<0.005 %	<0.005 %	<0.002 %	87 - 350 kHz
0 to +1,000V	CA10P-5	0 to 1 mA	<0.001 %	<0.005 %	<0.001 %	100 - 250 kHz
0 to -1,000V	CA10N-5	0 to 1 mA	<0.001 %	<0.005 %	<0.001 %	100 - 250 kHz
0 to +1,250V	CA12P-5	0 to 0.8 mA	<0.001 %	<0.005 %	<0.001 %	150 - 300 kHz
0 to -1,250V	CA12N-5	0 to 0.8 mA	<0.001 %	<0.005 %	<0.001 %	150 - 300 kHz
0 to +2,000V	CA20P-5	0 to 0.5 mA	<0.001 %	<0.005 %	<0.003 %	45 - 250 kHz
0 to -2,000V	CA20N-5	0 to 0.5 mA	<0.001 %	<0.001 %	<0.001 %	100 - 250 kHz

	INPUT CURRENT			
	CA02-CA12		CA20	
	NO-LOAD	FULL-LOAD	NO-LOAD	FULL-LOAD
VIN				
5 VDC	< 65mA	<420mA	<155 mA	<550 mA
12 VDC	<80 mA	<220 mA	<100 mA	<220 mA

ELECTRICAL SPECIFICATIONS*2 CA02 - CA20 (200V to 2000V)

PARAMETER	VALUE
INPUT VOLTAGE	INPUT MODELS: +11.5 TO +15.5v (STANDARD)
	5V INPUT MODELS: +4.75 TO +5.25V
STANDBY POWER	<25mW*3
INPUT CAPACITANCE	440uF
PROGRAMMING VOLTAGE	12V INPUT MODELS: 0 TO +5V, <150uA
	5V INPUT MODELS: 0 TO +2.048V <150uA
SET POINT ACCURACY*7	1%
GAIN ADJUST*7	1%
LINEARITY*7	<0.5% (15% TO 100% VOUT)
STABILITY	<0.005%/HR*3
VOLTAGE MONITOR*5	12V INPUT MODELS: 0 TO +5V = 0 TO 100% VOUT
	5V INPUT MODELS: 0 TO +2.048V = 0 TO 100% VOUT
REFERENCE OUTPUT	12V INPUT MODELS: +5V +/- 1% , UP TO 1 mA
	5V INPUT MODELS: +2.048V +/- 1% , UP TO 1 mA
TEMPCO	<25PPM/°C*3
THERMAL SHOCK LIMIT	1°C/10 SEC.
STANDARD TEMPERATURE RANGES	OPERATING: -10° TO +50°C*6 (CASE)
	STORAGE: -25° TO +95°C

APPLICATION NOTES

Sequencing

As is the case for all active electronics, the user should apply power prior to control inputs. For the CA Series, it is recommended to wait at least 100msec after input power is applied before sending a voltage programming command.

Dynamic Response

In cases where the output voltage rises above the voltage programming command then settles. To mitigate this effect, ramp the voltage programming input at a slower rate until satisfactory results are achieved.

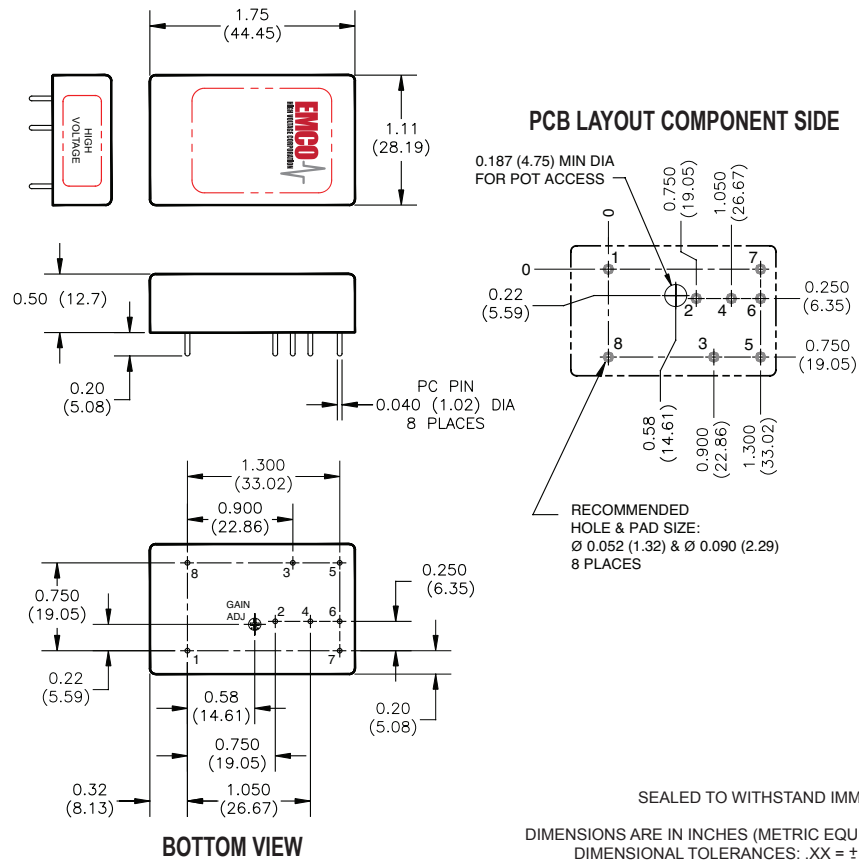
DETAILED PRODUCT DESCRIPTION

The CA Series of high performance, precision regulated, high voltage power supplies offers improved performance and added features. Improvements in stability and ripple, along with an on board precision reference, a voltage monitor and increased protection, enable these modules to replace much larger, more expensive power supplies in many applications. Each model is programmed from 0 to 100% of rated output via a DAC compatible high impedance programming input. A voltage monitor is provided and is internally buffered to provide a low impedance (up to 1 mA) signal to external circuitry. The precision, on board reference can be used in conjunction with an external potentiometer or voltage divider to program the high voltage output. Each unit has an accessible potentiometer allowing for individual calibration

after installation. A quasi-sinewave oscillator, internal transformer shielding, and an isolated steel case reduce EMI/RFI radiation to extremely low levels. Suitable for photomultiplier tubes, avalanche photodiodes, precision EO lenses, piezo devices and other applications requiring precision, low noise, high voltage in a miniature, pc or chassis mount, cost effective package. A proprietary encapsulation process and custom 94V-0 listed, high performance formula are used to achieve excellent high voltage and thermal properties.

Also available with the CA Series are the CM Series adapter kits. For more details, refer to pages 7 and 8.

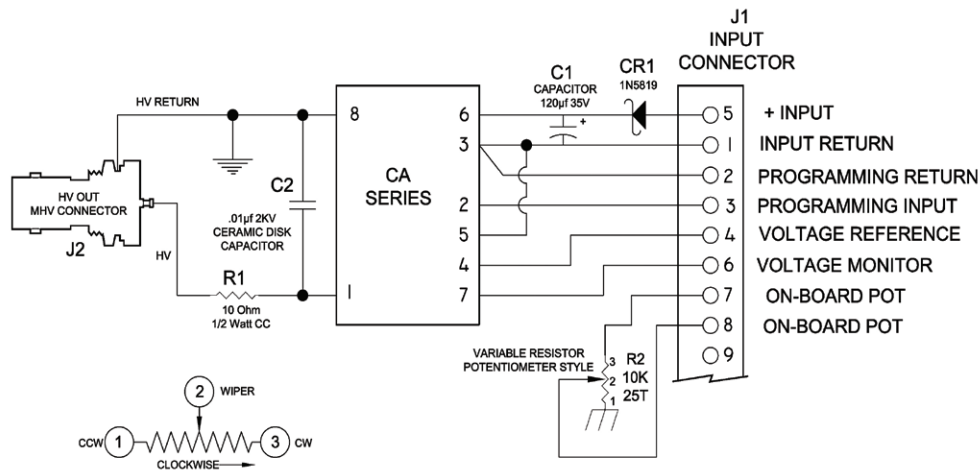
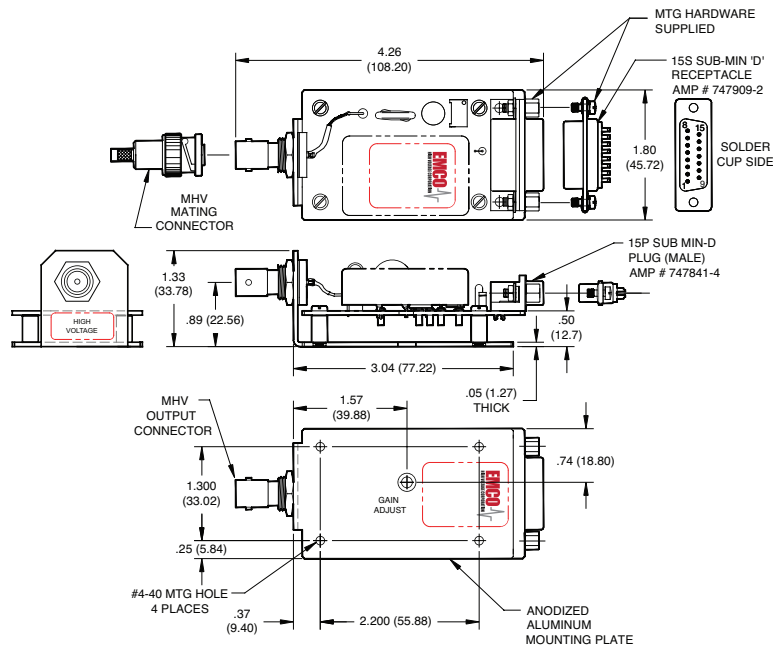
MECHANICAL SPECIFICATIONS



PARAMETER	VALUE
WEIGHT	1.4 OZ. (39.6 GRAMS)
VOLUME	0.96 CUBIC INCHES (15.77cm ³)
DIMENSIONS	1.75L (44.45) x 1.11W (28.19) x 0.50H (12.70)
CASE MATERIAL	ZINC PLATED STEEL

PIN #	FUNCTION
1	OUTPUT VOLTAGE
2	PROGRAMMING: 0 to +5V 5V Input models: 0 to +2.048V
3	GROUND ^{1,2}
4	VOLTAGE REFERENCE: +5V 5V Input models: +2.048V
5	CASE GROUND ^{1,2}
6	INPUT: +11.5V to 15.5V 5V Input models: +4.75 to +5.25V
7	VOLTAGE MONITOR: 0 to +5V 5V Input models: 0 to +2.048V
8	OUTPUT RETURN ^{1,2}

CM1 (MHV): ALL CA MODELS



PRODUCT DESCRIPTION

These adapters provide convenient proto-typing and evaluation during system development and integration, and allow these modules to be mounted to a chassis instead of designed in to a pc board.

Extra filtering on the input and output improves performance. A schottky diode on the input provides reverse polarity protection. Input connector is via a 15P SUB MIN-D plug (mate supplied) and output is via an MHV style coaxial connector (mate supplied).

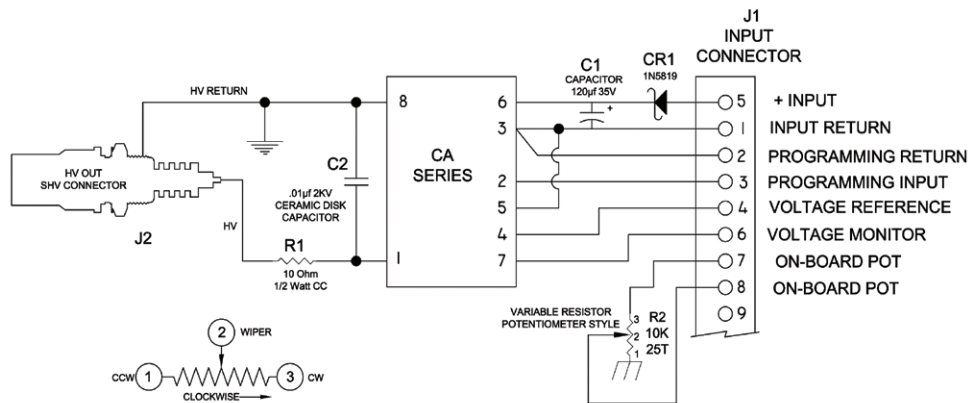
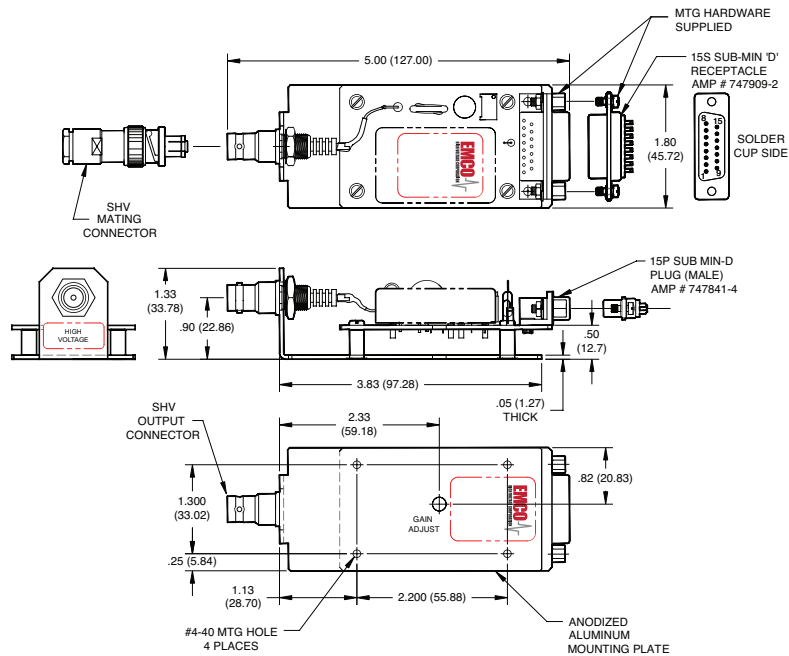
ORDERING INFORMATION:

Please note when ordering a CM1 the CA Series is not included and must be ordered separately.

PROGRAMMING OPTIONS / INSTRUCTIONS

1. Onboard Potentiometer: connect pins 7 to 4 and 8 to 3, turn potentiometer to adjust high voltage.
2. Remote Potentiometer: connect wiper arm to pin 3, other sides to pins 4 and 2.
3. Remote Analog Signal: apply programming voltage to pin 3, return to pin 2.

CM2 (SHV): ALL CA MODELS



PRODUCT DESCRIPTION

These adapters provide convenient proto-typing and evaluation during system development and integration, and allow these modules to be mounted to a chassis instead of designed in to a pc board.

Extra filtering on the input and output improves performance. A schottky diode on the input provides reverse polarity protection. Input connector is via a 15P SUB MIN-D plug (mate supplied) and output is via an SHV style coaxial connector (mate supplied).

ORDERING INFORMATION:

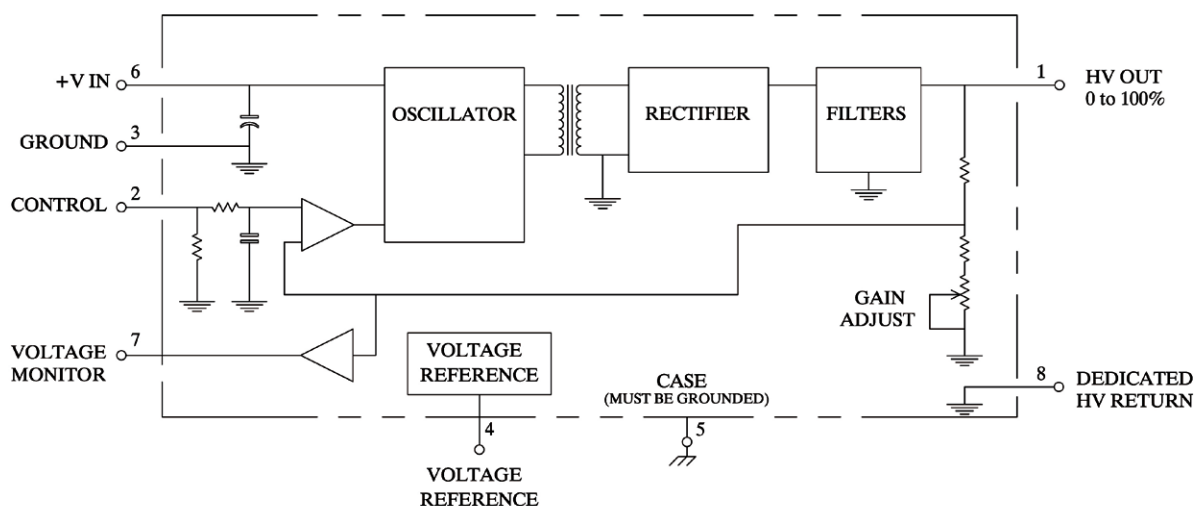
Please note when ordering a CM2 the CA Series is not included and must be ordered separately.

PROGRAMMING OPTIONS / INSTRUCTIONS

1. Onboard Potentiometer: connect pins 7 to 4 and 8 to 3, turn potentiometer to adjust high voltage.
2. Remote Potentiometer: connect wiper arm to pin 3, other sides to pins 4 and 2.
3. Remote Analog Signal: apply programming voltage to pin 3, return to pin 2.

We reserve the right to make changes without notification

BLOCK DIAGRAM



OPTIONS

OPTION	ORDER CODE	
POLARITY DESIGNATOR	POSITIVE OUTPUT	p
	NEGATIVE OUTPUT	N
INPUT VOLTAGE	5 VDC	5
	12 VDC (STANDARD)	BLANK
TEMPERATURE	STANDARD OPERATING TEMP -10° TO +50°C ⁶ (CASE TEMP.)	BLANK

HOW TO ORDER

PART NUMBER SELECTOR:

Model Number:

CA 10 N - 5

CA - Model **10** - Output Voltage (See table) **N** - Polarity Designator **5** - Input Voltage

EXAMPLE: **CA10N-5** (**CA** - Model, **10** - Output Voltage, **N** - Negative, **5** - Input Voltage)

* Notes:

- Maximum rated output current is typically available from 100% max output voltage to 50% max output voltage, and is derated below 50% max output voltage.
- Specifications after 1 hour warm-up, full load, at 25°C unless other wise indicated.
- Typical Performance
- All grounds internally connected, except case. There should not be more than 50 volts potential between the case ground (pin 5) and the circuit ground (pins 3 and 8). Isolated case assists low noise design efforts. Case pin must be connected to ground for proper operation. For ultra-low noise applications the case can be grounded to a low noise shielding ground.

- On negative output models, voltage monitor output is a buffered representation of the programming voltage.
- Proper thermal management techniques are required to maintain safe case temperature at maximum power output.
- SET POINT ACCURACY refers to the ability of the unit to accurately deliver the voltage intended by the applied programming. The resultant output voltage will be within +/-1% of that programmed.
GAIN ADJUSTMENT refers to the ability to alter the gain of the circuit to bring the resultant output voltage to the programmed setpoint. This is intended to allow compensation for set point accuracy error.
LINEARITY refers to how much the transfer function can deviate from a straight line in the absence of any set point error.

XP-EMCO reserves the right to make changes on products and literature, including specifications, without notice. XP-EMCO standard product models are not recommended for "copy-exact" applications or any other application restricting product changes. "Copy-exact" options are available. Please contact an XP-EMCO sales representative for more details.



Anexo 3 Esquema do controlador eletrônico

